



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

SÄRÖN SULKEUTUMINEN VÄSYTTÄVÄSSÄ KUORMITUKSESSA

Kimmo Kärkkäinen

Kandidaatintyö, jonka aihe on hyväksytty
Oulun yliopiston Konetekniikan koulutusohjelmassa 18. tammikuuta 2021

Ohjaaja: Tero Frondelius

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö)		Pääaineopintojen ala (lisansiaatintyö)	
Konetekniikka			
Tekijä		Työn valvoja	
Kärkkäinen, Kimmo		Frondelius, T Prof.	
Työn nimi			
SÄRÖN SULKEUTUMINEN VÄSYTTÄVÄSSÄ KUORMITUKSESSA			
Opintosuunta	Työn laji	Aika	Sivumäärä
Teknillinen mekaniikka	Kandidaatintyö	Maaliskuu 2021	50 s.
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työssä käydään läpi väsytyssärön sulkeutumista tutkivaa kirjallisuutta. Kirjallisuuskatsaus pitää sisällään ilmiön historiaa ja havainnollistavan kuvauksen tärkeimmistä väsytyssärön sulkeutumismekanismeista. Käsiteltävänä on myös kirjallisuudessa usein käytettyjä keinoja ja merkkeille pantuja haasteita ilmiön numeeriseen mallintamiseen liittyen.</p> <p>Vaikka väsytyssärön kasvua kontrolloivasta kärjen jaksollisesta plastisuudesta tiedettiin jo kohtalaisen paljon vuosia aiemmin, särön sulkeutuminen kuormitusjakson vetoalueella jäi jostain syystä huomiotta, kunnes 1970-luvun vaihteessa Elber havaitsi väsytyssärön sulkeutuvan ulkoisen kuormituksen ollessa vielä vedolla. Havainto johti suuriin tutkimusponnisteluihin tutkijoiden yrittäessä ymmärtää ilmiötä syvällisemmin. Ilmiön avulla onkin kyetty lisäämään ymmärrystä väsytyssäröjen mekaniikasta merkittävällä tavalla. Särön ennenaikaisella sulkeutumisella on myös särönkasvunopeutta alentava vaikutus, minkä vuoksi ilmiöön sidonnainen potentiaalinen hyöty voi olla suuri, mikäli se tunnettaisiin riittävän hyvin.</p> <p>Avainsanat: väsytyssärön kasvu; särön sulkeutuminen; särön kärjen plastisuus; särön sulkeutumisen mallintaminen</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis)		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Mechanical engineering			
Author		Thesis Supervisor	
Kärkkäinen, Kimmo		Frondelius, T Prof.	
Title of Thesis			
FATIGUE CRACK CLOSURE			
Major Subject	Type of Thesis	Submission Date	Number of Pages
Engineering mechanics	Bachelor's Thesis	March 2021	50 p.
<p>Abstract</p> <p>The purpose of present work is to review literature on fatigue crack closure. Literature review includes a historical overview and an illustrative description of the primary mechanisms inducing crack closure in fatigue. Furthermore, established methods and difficulties reported in literature regarding numerical simulation of the phenomenon are examined.</p> <p>Although cyclic plasticity, which controls fatigue crack propagation, was relatively well understood years before, it was not until the 1970s that crack closure under the tension phase of a load cycle was discovered. That was when Elber observed crack closure to take place despite an applied tensile load remaining active. His discovery led to extensive research efforts with researchers attempting to gain deeper understanding of the phenomenon, which has since aided in improving understanding of the mechanics of fatigue crack growth. In addition, crack closure has the effect of reducing fatigue crack growth rate, thus carrying potential to be of great value, given that it was understood well enough.</p> <p>Keywords: fatigue crack growth; crack closure; crack tip plasticity; crack closure simulation</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Työn tarkoitus on käydä läpi väsytyssärön sulkeutumista tutkivaa kirjallisuutta ja koota ilmiön relevantit perustiedot suomenkieliseen opinnäytetyöhön. Työ on tehty osana tutkimustyötäni Oulun yliopiston materiaali- ja konetekniikan tutkimusyksikössä. Työn aiheen on antanut professori Tero Frondelius, joka toimii myös työn ohjaajana. Professori Frondeliuksen neuvojen lisäksi suurta apua työn suorituksessa vaadittavaan kirjallisuustutkimukseen ja tieteelliseen kirjoittamiseen on antanut diplomi-insinööri Joonas Vaara, jota haluan erityisesti kiittää. Haluan myös kiittää Metallinjalostajien rahastoa opintojeni tukemisesta apurahan avulla.

Oulu, 11. maaliskuuta 2021



Kimmo Kärkkäinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
MERKINNÄT JA LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	9
2 SÄRÖN SULKEUTUMINEN ILMIÖNÄ	10
2.1 Ilmiön havaitseminen ja historia	10
2.2 Särön ennenaikainen sulkeutuminen	15
2.3 Ilmiön esiintyminen	18
3 SULKEUTUMISMEKANISMIT	21
3.1 Plastisuuden aiheuttama sulkeutuminen	21
3.2 Karkeuden aiheuttama sulkeutuminen	27
3.3 Korroosion aiheuttama sulkeutuminen	29
3.4 Muut sulkeutumismekanismit	31
4 NUMEERINEN MALLINTAMINEN	33
4.1 Mallinnusohjelmisto	33
4.2 Kappaleen geometria	34
4.3 Elementtiverkko	35
4.4 Särön etenemistapa	37
4.5 Materiaalimalli	38
4.6 Tulosten tulkinta	39
5 YHTEENVETO	41
6 LÄHDELUETTELO	42

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	pinta-ala
C	materiaalivakio Parisin laissa
F	muototekijä jännitysintensiteettikertoimen lausekkeessa
K	jännitysintensiteettikerroin
K_{cl}	jännitysintensiteettikertoimen arvo särön sulkeutuessa, sulkeutumisjännitysintensiteettikerroin
K_{op}	jännitysintensiteettikertoimen arvo särön avautuessa, avautumisjännitysintensiteettikerroin
K_{max}	jännitysintensiteettikertoimen maksimiarvo
K_{min}	jännitysintensiteettikertoimen minimiarvo
P	ulkoinen kuormitus
P_{cl}	ulkoisen kuormituksen arvo särön sulkeutuessa, sulkeutumiskuormitus
P_{op}	ulkoisen kuormituksen arvo särön avautuessa, avautumiskuormitus
P_{max}	ulkoisen kuormituksen maksimiarvo
P_{min}	ulkoisen kuormituksen minimiarvo
R	kuormitussuhde
U	särön sulkeutumisen voimakkuutta kuvaava termi, särön avonaisuuden osuus kuormitusjaksossa
ΔK	jännitysintensiteettikertoimen heilahdus eli vaihteluväli

ΔK_{eff}	efektiivinen jännitysintensiteettikertoimen heilahdus eli vaihteluväli särön sulkeutumisen tapahtuessa ennenaikaisesti
ΔK_{th}	jännitysintensiteettikertoimen heilahduksen eli vaihteluvälin kynnysarvo särönkasvulle
ΔP	ulkoisen kuormituksen heilahdus eli vaihteluväli
ΔP_{eff}	efektiivinen ulkoisen kuormituksen heilahdus eli vaihteluväli särön sulkeutumisen tapahtuessa ennenaikaisesti
$\Delta \sigma$	ulkoisen kuormituksen aiheuttaman jännityksen heilahdus eli vaihteluväli
$\Delta \sigma_{\text{eff}}$	efektiivinen ulkoisen kuormituksen aiheuttaman jännityksen heilahdus eli vaihteluväli särön sulkeutumisen tapahtuessa ennenaikaisesti
Δr_{pl}	puristusplastisen alueen pituus (reversed plastic zone length)
σ	ulkoisen kuormituksen aiheuttama jännitys
σ_y	myötöjännitys, myötöraja
σ_{cl}	ulkoisen kuormituksen aiheuttaman jännityksen arvo särön sulkeutessa, sulkeutumisjännitys
σ_{op}	ulkoisen kuormituksen aiheuttaman jännityksen arvo särön avautuessa, avautumisjännitys
σ_{max}	ulkoisen kuormituksen aiheuttaman jännityksen maksimiarvo
σ_{min}	ulkoisen kuormituksen aiheuttaman jännityksen minimiarvo
a	särön pituus
m	materiaalivakio Parisin laissa

r_{pl}	vetoplastisen alueen pituus (monotonic plastic zone length)
t	aika
$\Delta CTOD$	särön kärjen avautuman heilahdus eli vaihteluväli (cyclic crack tip opening displacement)
$d_y(x)$	särön profili
da/dN	särönkasvunopeus
CT	standardin ASTM E647 mukainen koesauva (compact tension specimen)
MT	standardin ASTM E647 mukainen koesauva (middle tension specimen)
OICC	korroosion aiheuttama särön sulkeutuminen (oxide induced crack closure)
PICC	plastisuuden aiheuttama särön sulkeutuminen (plasticity induced crack closure)
RICC	karkeuden aiheuttama särön sulkeutuminen (roughness induced crack closure)
FEM	elementtimenetelmä (finite element method)
HCF	suuren kuormanvaihtoluvun väsyminen (high cycle fatigue)
LCF	pienen kuormanvaihtoluvun väsyminen (low cycle fatigue)
SEM	pyyhkäisyelektronimikroskooppi (scanning electron microscope)
VHCF	erittäin suuren kuormanvaihtoluvun väsyminen (very high cycle fatigue)

1 JOHDANTO

Metallisten materiaalien väsyminen aiheuttaa suuren osan rakenteiden vaurioista. Väsymisvaurion kehittyminen on yleensä staattisen kuormituksen aiheuttaman vaurion kehittymistä hankalampaa havaita ja ennustaa (Chowdhury & Sehitoglu 2016). Väsyminen tutkimusalueena onkin laajentunut huomattavasti useiden vuosikymmenien ajan.

Tämä työ käy kirjallisuuskatsauksen merkeissä läpi väsytyssärön ennen aikaista sulkeutumista, joka on eräs tärkeä väsymiseen ja murtumismekaniikkaan liittyvä ilmiö. Tarkastelun kohteena ovat ilmiön fysiikka ja historia, sekä numeerista mallintamista hyödyntävät tutkimusmenetelmät. Särön ennenaikaisen sulkeutumisen avulla voidaan selittää muun muassa kuormitussuhteen ja -historian vaikutusta väsytyssärön käyttäytymiseen kimmoisassa materiaalissa (Pippan & Hohenwarter 2017). Ilmiön tunteminen auttaa ennustamaan väsytyssäröjen käyttäytymistä entistä tarkemmin.

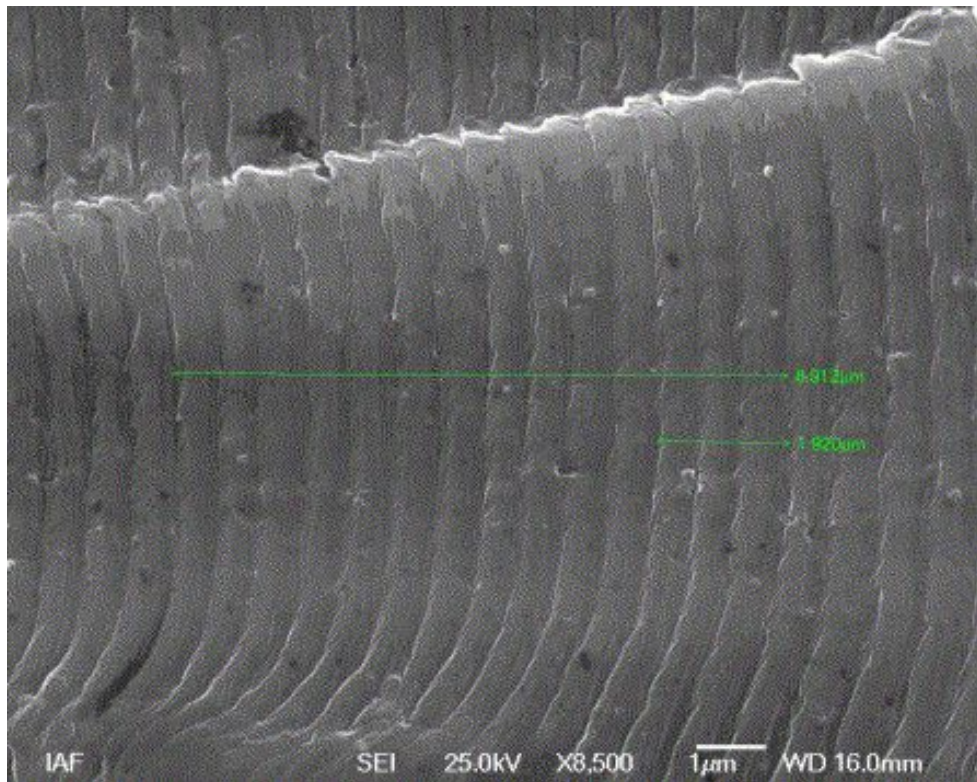
Tärkeimpänä sulkeutumismekanismina pidetty plastisuuden aiheuttama särön sulkeutuminen tunnetaan jo sen verran hyvin, että suuressa osassa tapauksia sen vaikutukset kyetään ennustamaan. Muut sulkeutumismekanismit, joista tärkeimpinä mainittakoon karkeuden ja korroosion aiheuttama sulkeutuminen, sen sijaan pitävät sisällään niin paljon tuntemattomia muuttujia, ettei niiden vaikutusten ennustaminen ainakaan vielä onnistu luotettavasti – puhumattakaan mekanismien yhteisvaikutuksista. (Pippan & Hohenwarter 2017; Antunes & Rodrigues 2008)

Nykyään helpoin tapa tutkia väsytyssäröjen käyttäytymistä on numeerisesti, esimerkiksi elementtimenetelmään pohjautuvalla tietokoneohjelmalla. Numeerisessa mallintamisessa mallinnustilanteet ja -parametrit voidaan verrattaen vaivattomasti asettaa halutuiksi, mikä tekee monimutkaisen ilmiön tiedonkeruusta tehokasta. Mallintaminen on kuitenkin suoritettava huolellisesti, sillä ainakin toistaiseksi siihen liittyy suuri määrä yksinkertaistuksia ja oletuksia, jotka voivat vaikuttaa tulosten paikkansapitävyyteen. (Antunes & Rodrigues 2008)

2 SÄRÖN SULKEUTUMINEN ILMIÖNÄ

2.1 Ilmiön havaitseminen ja historia

Väsytyssäröjä tutkittiin pitkään pelkillä optisilla mikroskoopeilla. 1950-luvulla tapahtuneen elektronimikroskooppien kehityksen myötä säröpinnoilla oli mahdollista havaita juovia (kuva 1), joita särö muodostaa edetessään väsyttävän kuormituksen alaisena, ja jotka antavat tietoa särön jaksollisesta käyttäytymisestä. (Pippan & Hohenwarter 2017)



Kuva 1: Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (SEM) väsytyssärön säröpinnasta AA-2024-T3-alumiinissa (Hershko et al. 2008). Jaksollisessa kuormituksessa muodostuneet juovat erottuvat selkeästi.

Murtumismekaniikan ongelmia tutkivat 1960-luvulla muun muassa Irwin ja Dugdale. Dugdale (1960) esitti plastisen alueen koon, ulkoisen kuormituksen ja särön pituuden välistä suhdetta kuvaavan mallin, joka toimii tänäkin päivänä pohjana useissa tutkimuksissa, arvioitaessa plastisen alueen kokoa. Irwinin (1968) kehittämää lineaarielastista murtumismekaniikkaa hyödynnetään jatkuvasti perustana useille särön sulkeutumista käsitteleville tutkimuksille.

Christensen (1963) esitti ensimmäisen kerran ajatuksen säröpintavuorovaikutuksen aiheuttamasta särön kärjen jännityksen alenemisesta ja väsymisiän pidentymisestä. Väsytyssäröjä alettiin käsittelemään murtumismekaniikan malleilla ja metodeilla 1960-luvun puolivälissä, soveltamalla muun muassa jännitysintensiteettikerrointa K (Sih et al. 1965). Hieman myöhemmin analyyttisiä malleja muokattiin kuvaamaan jaksollista deformaatiota, korvaamalla jännitysintensiteettikerroin jännitysintensiteettikertoimen heilahduksella ΔK (Rice 1967). Tältä aikakaudelta kaiketi tärkein malli on empiirisesti muodostettu Parisin laki (1), joka kuvaa väsytyssärön kasvunopeutta da/dN materiaaliveikkojen C ja m sekä jännitysintensiteettikertoimen heilahduksen ΔK avulla (Paris & Erdogan 1963).

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1)$$

Vuonna 1970, Elber esitti ensimmäisen kerran säröpintojen kontaktin saattavan tapahtua tykyttävässä vetokuormituksessa. Seuraavana vuonna ennenaikainen kontakti havaittiin empiirisesti 2024-T3-alumiinilevyn väsytykskokeessa; särö sulkeutui, kun kuormitus oli vielä vedolla (Elber 1971). Aiemmin särön sulkeutumisen oletettiin tapahtuvan ainoastaan puristavassa kuormituksessa.

Elber epäili ennenaikaisen kontaktin johtuvan plastisesta muodonmuutoksesta etenevän särön kärjessä ja sen takana. Nykyään ilmiö tunnetaan plastisuuden aiheuttamana särön sulkeutumisena. Hänen havaintonsa ja esittämänsä jatkotutkimusta vaativat ongelmat, kuten avautumis- ja sulkeutumiskuormituksen määrittäminen, saivat aikaan suuria tutkimusponnisteluja väsytyssärön ennenaikaisen sulkeutumisen ilmiöön ja mekanismeihin (Antunes & Rodrigues 2008). Toinen tärkeä löydös 1970-luvulla oli niin kutsuttu lyhyen särön ilmiö; lyhyiden säröjen huomattiin kasvavan pitkiä säröjä nopeammin samalla jännitysintensiteettikertoimen arvolla, ja voivan edetä jo särönkasvun jännitysintensiteettikertoimen kynnysarvon ΔK_{th} alapuolella (Pippan & Hohenwarter 2017).

Plastisuuden aiheuttaman sulkeutumisen lisäksi seuraavan vuosikymmenen aikana esitettiin myös muita ennen aikaista kontaktia aiheuttavia mekanismeja, merkittävimpiä karkeuden ja korroosion aiheuttama särön sulkeutuminen (Ritchie et al. 1980; Suresh & Ritchie 1981, 1982). Särön sulkeutumisen tutkimiseen käytettiin aluksi lähes yksinomaan analyyttisiä ja empiirisiä tutkimusmenetelmiä. Tutkijat pyrkivät määrittämään erilaisissa ympäristöissä ja kuormitustilanteissa kasvavien säröjen avautumisjännityksen σ_{op} , ja sitä kautta ymmärtämään ilmiötä syvällisem-

min. Useat erilaiset mittaamistekniikat kuitenkin johtivat erilaisiin tuloksiin, eikä yhteisymmärrystä parhaasta empiirisestä tutkimusmenetelmästä päässyt syntyään. Empiiriseen tarkasteluun liittyi muitakin heikkouksia, kuten väsymistestauksen korkea hinta, mittaamisen epätarkkuus, sekä fyysisen kappaleen asettamat tiedonkeruun rajoitteet – esimerkiksi paksun koesauvan keskeltä, läheltä särön kärkeä, särön avautumaa ei voitu määrittää. (McClung & Sehitoglu 1989a)

Fysikaalisen analyttisen mallin luomista hankaloitti ongelman monimutkaisuus ja epälineaarisuus (McClung & Sehitoglu 1989a). Kasvavan särön muodonmuutoksien tarkka kuvaaminen analyttisesti on äärimmäisen vaivalloista, puhumattakaan korkeuden, korroosion, ja mahdollisesti myös muiden mekanismien aiheuttaman sulkeutumisen sisällyttämisestä, plastisuuden aiheuttaman särön sulkeutumisen lisäksi. Niin monimutkaisen mallin luominen tai käyttö ei välttämättä ole tarkoituksenmukaista. Useita yksinkertaisia malleja kuitenkin luotiin ja luodaan edelleen, ja ne ovat tänäkin päivänä hyödyllisiä muun muassa tulosten suuruusluokkavertailun ja alkuarvausten tekemisen kannalta. Suuri osa särönkasvunopeutta ennustavista malleista pohjautuvat Parisin lakiin (1).

1970-luvun puolivälissä särön sulkeutumista alettiin tutkia numeerisesti elementtimenetelmää hyödyntävillä tietokoneohjelmilla. Ensimmäinen merkittävä särön sulkeutumiseen keskittyvä elementtimenetelmäänalyysi julkaistiin Ohjin, Oguran ja Ohkubon toimesta vuonna 1974. Heidän tutkimuksensa käsitteli lineaarisiin kolmioelementteihin jaettua kaksiulotteista levykappaletta tasojännitystilassa, keskittyen myöhemmin etenkin särön etenemiseen lovista sekä vaihtelevien kuormitustilanteiden vaikutukseen. Simuloidut tulokset osoittivat särön sulkeutuvan vetokuormituksella, ja efektiivisen jännityksen vaihteluvälin $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ alenevan särön kasvaessa (Ohji et al. 1975), mikä merkitsee särön sulkeutumisen kehittymistä, vastaten Elberin havaintoja. Samoihin aikoihin Newman (1976) julkaisi oman tutkimuksensa tuloksia, keskittyen enemmän itse elementtimenetelmämallin yksityiskohtiin.

Seuraavan kymmenen vuoden aikana julkaistiin vain muutamia papereita ilmiötä käsittelevistä numeerisista tutkimuksista, laajentaen tutkimusaluetta muun muassa satunnaisen ylikuormituksen (Shiratori et al. 1977) ja kuormitussuhteen vaikutuksiin (Blom & Holm 1985), sekä väsyty- ja staattisten säröjen vertailuun (Nakamura et al. 1984). 1980-luvun puolivälin paikkeilla mielenkiinto elementtimenetelmän hyödyntämiseen särön sulkeutumisen tutkimisessa nousi jyrkästi, ja huomiota sai osakseen muun muassa kolmiulotteisissa kappaleissa kasvava särö (Chermahini 1986).

Vuonna 1990 Forman & Mettu kehittivät oman NASGRO-nimisen särönkasvumallinsa, pohjautuen Newmanin (1981, 1984) elementtimenetelmäsimulaatioiden avulla kehitettyihin malleihin. Parisin laista (1) poiketen NASGRO-malli huomioi muun muassa myös keskijännitysriippuvuuden.

1990-luvun vaihteessa Kang et al. (1990) tutkivat kokeellisesti kappaleeseen hitsaamalla aiheutettujen jäännösjännitysten vaikutusta särön sulkeutumiseen. He havaitsivat merkillistä sulkeutumiskäyttäytymistä jäännösjännityskentän muutosalueella, jossa särön kärki eteni puristavasta jäännösjännityksestä vetävän alaisuuteen. Särö avautui normaalisti, mutta vaikutti sulkeutuvan vain osittain, muodostaen pienen avonaisen alueen särön kärkeen, joka sulkeutui vasta lähellä minimijännitystä, mikä kiihdytti särönkasvua. Myöhemmin Choi & Song (1995) vahvistivat ilmiön elementtimenetelmäänalyysillä. Ilmiön kautta on pyritty kuvaamaan muun muassa ylikuormituksen vaikutusta särön sulkeutumiseen (Paris et al. 1999; Borrego et al. 2003).

Samoihin aikoihin McClung & Sehitoglu (1989b) julkaisivat oman kaksiulotteisen, lineaarisista neliöelementeistä koostuvan FEM-mallinsa tuloksia, selvittäen erilaisten materiaaliominaisuuksien, kuten muokkauslujittuvuuden ja myötörajan, erilaisten kuormitusparametrien, kuten kuormitussuhteen ja maksimijännityksen, sekä kaksiakselisen kuorman vaikutuksia, sekä näiden yhteisvaikutuksia. He esittivät myös kriittisiä huomionkohteita mallinnuksessa, kuten elementtityyppi, verkon tiheys, särön etenemistapa ja tulosten vakautumisen kannalta riittävä särönkasvupituus eli etenemä, antaen lisäksi suosituksensa näille parametreille (McClung & Sehitoglu 1989a). He havaitsivat muun muassa plastisuuden aiheuttaman särön sulkeutumisen menettävän merkitystään maksimijännityksen kasvaessa, ja avautumisjännityksen olevan yleensä sulkeutumisjännitystä korkeampi tarkasteltaessa sulkeutumista säröpintakontaktin perusteella (McClung & Sehitoglu 1989b).

Hieman myöhemmin McClung, Thacker ja Roy (1991) julkaisivat tuloksia päivityksiä saaneesta mallista, visualisoiden jännityksiä ja venymiä särön kärjen ympärillä sekä tasojännitys-, että tasovenymätilassa, mikä on auttanut tutkijoita ymmärtämään väsytyssäröön liittyviä muodonmuutoksia ja materiaalin siirtymistä. He totesivat särön sulkeutumista tapahtuvan myös puhtaassa tasovenymätilassa, mistä oli kiistelty pitkään, ja antoivat mahdollisia selityksiä erimielisyyksille, huomauttaen muun muassa ilmiön kokeellisen havaitsemisen olevan äärimmäistä tarkkuutta vaativaa. McClungin ja kollegoiden huolellinen elementtimenetelmäänalyysi herätti mielenkiintoa jo ennestään kiinnostavaan ongelmaan, vaikuttaen osaltaan element-

timenetelmän nousuun pääasialliseksi työkaluksi särön sulkeutumisen tutkimiseen.

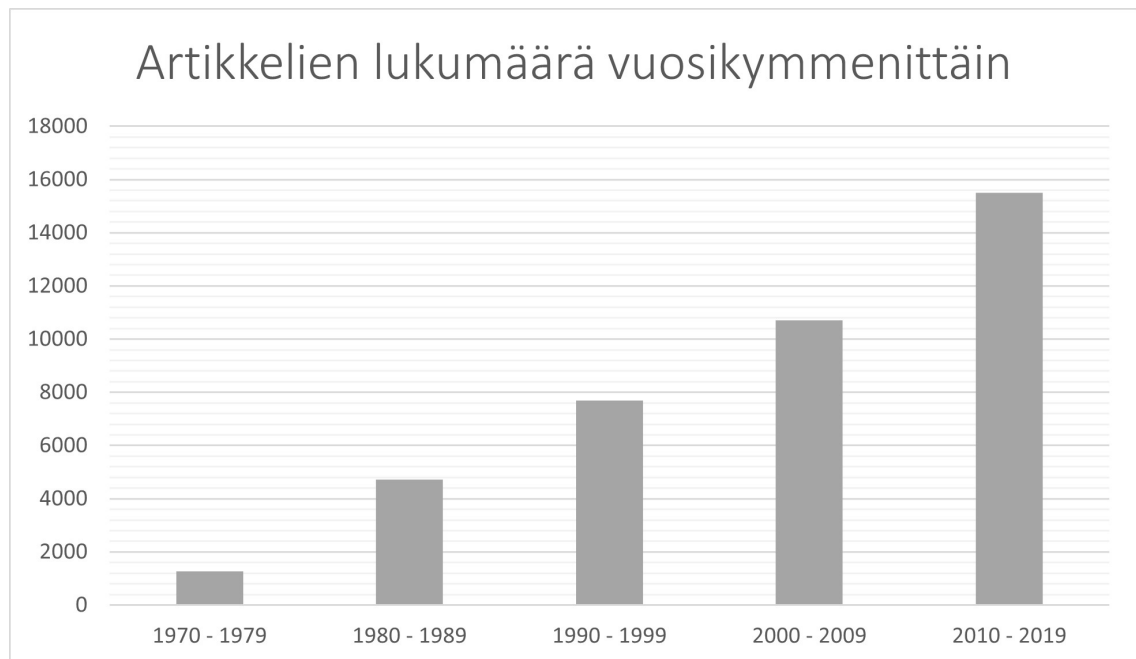
Vuosituhanen loppu käytettiin useiden teoreettisten (Louat et al. 1993; Chen et al. 1996; McEvily & Ritchie 1998) ja kokeellisten (Vormwald & Seeger 1991; Dubey et al. 1997) analyysien lisäksi numeerisen mallintamisen hiomiseen, tutkien muun muassa särön sulkeutumisen kehittymistä lovesta kasvavan särön tapauksessa (McClung & Sehitoglu 1992), sekä kappaleen geometrian (McClung 1994), elementtikoon (Park et al. 1997), yli- ja alikuormituksen (Dougherty et al. 1997; Pommier & Bompard 2000) ja muokkauslujittuvuuden sekä Bauschinger-efektin (Pommier & Bompard 2000) vaikutusta.

2000-luvulla elementtimenetelmäanalyysit ovat edelleen lisänneet osuuttaan särön sulkeutumisen tutkimisessa. Numeerisen mallintamisen alkaessa muodostua luotetuksi menetelmäksi kvantitatiivisen tutkimusdatan lisääntyessä ja yhdenmukaistuksessa, huomiota on alkanut herättää muun muassa kehittyneempien materiaaliominaisuuksien, kuten muokkauslujittuvuus, *strain ratcheting* ja jännitysrelaksaatio, kuvaaminen numeerisissa analyyseissä (Jiang et al. 2005; Antunes & Rodrigues 2008).

Vuosituhanen vaihteen jälkeen kolmiulotteisten analyysien osuus on alkanut kasvaa hyvää vauhtia tietokoneiden laskentatehon kehittyessä (Roychowdhury & Dodds 2003b; Branco et al. 2008; Camas et al. 2011). Enemmistö tutkimuksista on keskitynyt plastisuuden aiheuttamaan särön sulkeutumiseen, ja tyypillisesti eri sulkeutumismekanismien vuorovaikutus toistensa kanssa on jätetty huomiotta (Antunes & Rodrigues 2008). Vain muutamia useampia sulkeutumismekanismeja huomioon ottavia analyysejä on toteutettu (Parry et al. 2000; Newman et al. 2003).

2010-luvulla ja sen jälkeen särön sulkeutumisen numeerista mallintamista on edelleen hiottu herkkyyksianalyyseillä muun muassa kappaleen paksuuden (Camas et al. 2011), elementtikoon (Camas et al. 2018), etenemän (Camas et al. 2020), materiaalimallin (Ellyin & Ozah 2010; Borges et al. 2020) ja lämpötilan (Caspersen et al. 2014) vaikutuksesta. Mallien yksinkertaistuksia on pyritty vähentämään huomioimalla muun muassa kärjen tylpistyminen (Toribio & Kharin 2013) ja särörintaman luonnollinen kaarevuus (Gardin et al. 2016).

Google Scholar -haun mukaan kiinnostus särön sulkeutumisesta kohtaan on kasvanut tasaisesti ilmiön havaitsemisen jälkeen, kuten kuvasta 2 käy ilmi. Fraasilla *crack closure* löytyy noin 15500 artikkelia vuosilta 2010–2019 ja 10700 vuosilta 2000–2009.



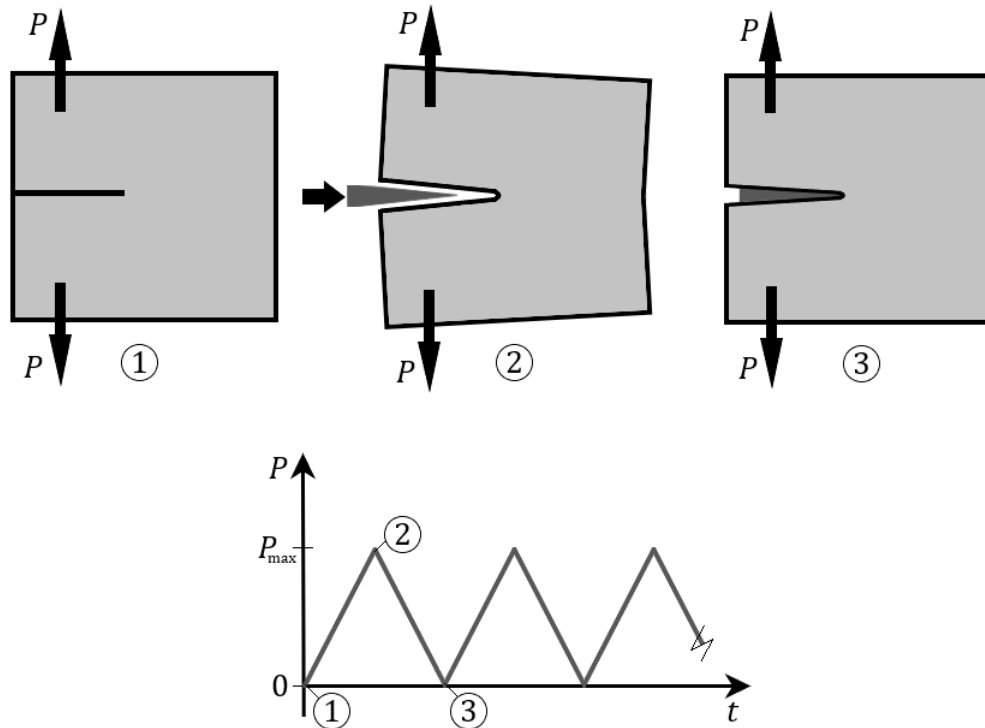
Kuva 2: Google Scholar -haulla, fraasilla *crack closure*, löytyvien osumien lukumäärä vuosikymmenittäin.

Osa ennenaikaiseen sulkeutumiseen liittyvistä ilmiöistä tunnetaan jo hyvin, ja kyetään ennustamaan kohtalaisen luotettavasti, kuten plastisuuden aiheuttama särön sulkeutuminen vakioamplitudisessa kuormituksessa. Siitä huolimatta oikeiden väsytyssäröjen, joiden käyttäytyminen määräytyy muun muassa useiden sulkeutumismekanismien, kuormituksen epämääräisyyden ja mikrorakenteellisen epähomogeenisuuden yhteisvaikutuksesta, käyttäytymisen luotettava ennustaminen vaatii vielä paljon työtä (Pippan & Hohenwarter 2017).

2.2 Särön ennenaikainen sulkeutuminen

Särön sulkeutumisen vaikutus särönkasvuun on merkittävää lähinnä avaavassa kuormituksessa, minkä vuoksi leikkaavia kuormitustapauksia ei käsitellä tässä työssä. Vetokuormitetun särön kärjessä vaikuttaa voimakas jännityskeskittymä alhaisella kuormituksella (Pennala 2000). Tämä jännityskeskittymä, toistuessaan useita kertoja väsyttävässä kuormituksessa, kasvattaa säröä eli aiheuttaa väsymisvauriota. Yleisesti oletetaan, että avaavan kuormituksen aiheuttama väsymisvaurio kehittyy merkityksettömän vähän särön ollessa sulkeutuneena (Jiang et al. 2005; Pippan & Hohenwarter 2017). Toisin sanoen, yleensä ainoastaan avonainen särö voi kasvaa puhtaasti avaavassa kuormituksessa. Tällöin kaikki, mikä pienentää särön avonai-

suuden osuutta kuormitusjaksossa, pidentää väsymisikää, mikä on yleensä varsin tavoiteltavaa.



Kuva 3: Periaatekuva särön ennenaikaisen sulkeutumisen mekanismeista kuvaavan kiilan asettamisesta särön väliin tykyttävässä kuormituksessa. Kuormituskuvaajassa pystyakselilla on kuormitus $P \in [0, P_{max}]$, ja vaakakselilla on aika t .

Ajatellaan seuraavaksi kuvan 3 mukaista säröä, jota kuormitetaan tykyttävällä veto-kuormituksella, jossa minimikuormitus on nolla. Särö on sulkeutuneena minimikuormituksella 1. vaiheessa, mutta avautuu välittömästi kuormituksen kasvaessa. Särön ollessa avonainen vaiheessa 2, särön väliin asetetaan jäykkä kiila, joka estää särön sulkeutumisen. Kuormituksen laskiessa kiila puristuu särön väliin kappaleen kokeman elastisen muodonmuutoksen palautumisen seurauksena. Minimikuormituksella, vaiheessa 3, kiilan aiheuttamat puristavat jännitykset ovat jo kohtalaisen suuria. Kun kuormitus uudelleen kasvaa, särön voidaan ajatella avautuvan vasta, kun ulkoinen kuormitus on tarpeeksi suuri kumoamaan kiilan aiheuttamat puristavat jännitykset, ja sulkeutuvan jo, kun kiila alkaa puristua särön välissä. Kiila on pienentänyt kuormitusjakson osuutta, jossa särön kärki kokee jännityskeskittymän särön ollessa avonainen, ja täten kasvattanut kappaleen väsymisikää.

Kaikki särön ennenaikaisen sulkeutumisen mekanismit toimivat edellä käydyn ajatusleikin periaatteella. Kuvataksemme ilmiötä matemaattisesti, aloitamme muuta-

man tärkeän parametrin määrittelyllä. Jos kappaletta kuormitetaan jaksollisella kuormituksella $P \in [P_{\min}, P_{\max}]$, kuormituksen vaihteluväli eli heilahdus ΔP määritellään kaavalla (2).

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad (2)$$

Samoin voidaan määritellä myös jännityksen heilahdus $\Delta\sigma$ sekä jännitysintensiteettikertoimen heilahdus ΔK kaavojen (3) ja (4) mukaisesti.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (4)$$

Särön ennen aikaisen sulkeutumisen kehittyessä on asianmukaista käyttää kaavan (5) mukaista efektiivistä jännitysintensiteettikertoimen heilahdusta ΔK_{eff} , joka huomioi ainoastaan kuormitusjakson osion, jossa särö on avonainen; jännitysintensiteettikertoimen minimiarvo K_{\min} korvataan särön sulkeutumishetkeä vastaavalla jännitysintensiteettikertoimen arvolla eli sulkeutumisjännitysintensiteettikertoimella K_{cl} (Pippan & Hohenwarter 2017).

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\max} - K_{\text{cl}} \quad (5)$$

Kuormituksen P ja jännityksen σ suhde saadaan kaavalla (6),

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

jossa A on kuormituksen suuntaan kohtisuora pinta-ala (Pennala 2000). Lineaarisessa murtumismekaniikassa jännityksen σ ja jännitysintensiteettikertoimen K suhde saadaan kaavalla (7),

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}F \quad (7)$$

jossa a on särön pituus ja F muototekijä (Pennala 2000). Kaavojen (6) ja (7) mukaisen kuormituksen, jännityksen ja jännitysintensiteettikertoimen lineaarisen riippuvuuden nojalla kaava (5) pätee myös jännitykselle ja kuormitukselle kaavojen (8) ja (9) mukaisesti.

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\max} - \sigma_{\text{cl}} \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{eff}} = P_{\text{max}} - P_{\text{cl}} \quad (9)$$

Särön sulkeutumisen voimakkuutta kuvataan usein myös särön avautumishetkeä vastaavan kuormituksen arvon eli avautumiskuormituksen P_{op} avulla termillä U kaavan (10) mukaisesti (Antunes & Rodrigues 2008).

$$U = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{op}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \quad (10)$$

Kaavassa (10) $U \in [0, 1]$. $U = 0$ vastaa tilannetta, jossa $P_{\text{op}} = P_{\text{max}}$, eli särö ei avaudu, ja $U = 1$ tilannetta, jossa $P_{\text{op}} = P_{\text{min}}$, eli särö ei sulkeudu. Tyypillisesti särö avautuu ja sulkeutuu eri kuormituksen arvoilla, eli $P_{\text{op}} \neq P_{\text{cl}}$ (Antunes & Rodrigues 2008), jolloin $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ ja U eivät ole täysin vertailtavissa. ΔK_{eff} voidaan kuitenkin määritellä myös avautumisjännitysintensiteettikertoimen K_{op} funktiona, jolloin $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K = U$ (Kang et al. 1989).

Jaksollisen kuormituksen luonnetta kuvaa hyvin kuormitussuhde R , joka määritellään kaavan (11) mukaisesti (Kang et al. 1989).

$$R = \frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{max}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{K_{\text{min}}}{K_{\text{max}}} \quad (11)$$

Kaavassa (11) $R = 1$ vastaa staattista kuormitusta, $R = 0$ tykyttävää vetokuormitusta, $R = -1$ symmetristä vaihtokuormitusta, $R = -\infty$ tykyttävää puristuskuormitusta, ja niin edelleen.

2.3 Ilmiön esiintyminen

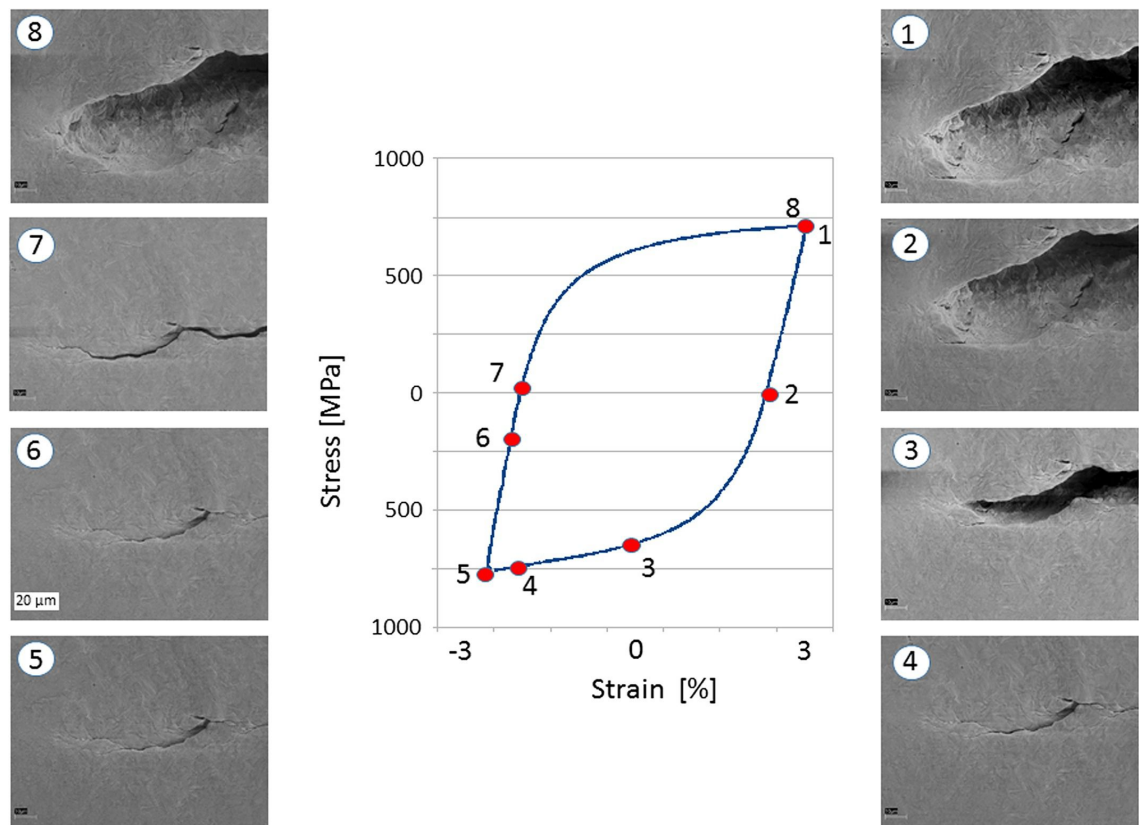
Väsyttävässä kuormituksessa kuormitusjaksojen lukumäärällä on määräävä merkitys särön sulkeutumistavan kannalta – särön ennen aikainen sulkeutuminen on merkittävää kuormanvaihtoluvun ollessa suuri (Pippan & Hohenwarter 2017). Väsyttävän kuormituksen kuormanvaihtojen eli kuormitusjaksojen lukumäärästä puhuttaessa käytetään usein termejä pienen kuormanvaihtoluvun väsyminen (LCF, low cycle fatigue), suuren kuormanvaihtoluvun väsyminen (HCF, high cycle fatigue), sekä nykyään myös erittäin suuren kuormanvaihtoluvun väsyminen (VHCF, very high cycle fatigue) (Nicholas 1999; McEvily et al. 2008).

Kuormitusjaksojen lukumäärällä, eli kappaleen eliniällä on yhteys kuormituksen suuruuteen; suuremmalla maksimikuormituksella kuormitusjaksoja on vähemmän,

koska särön eteneminen on nopeampaa. Tällöin myös särön kärkeä ympäröivä plastinen alue on suurempi. Kun väsytyssärön eteneminen on tarpeeksi hidasta, eli kun kuormitusjaksojen lukumäärä tietyllä etenemällä on tarpeeksi suuri, lineaarisessa murtumismekaniikassa keskeinen *small scale yielding* -ehto täyttyy. *Small scale yielding* vaatii, että materiaalin kokema plastinen muodonmuutos särön kärjessä on pientä, eli plastisen alueen koko sillä hetkellä, jolla kriittinen kuormitustaso saavutetaan, on kohtuullisen pieni suhteessa särön pituuteen ja materiaaalipaksuuteen (Pennala 2000; Broberg 1999).

Säröillä, joiden sulkeutumismekanismit ovat täysin kehittyneet, *small scale yielding* -ehdon toteutuessa sulkeutumistaso on aina vedolla. Ainoastaan välittömästi ylikuormituksen jälkeen, tai minimijännityksen ollessa lähellä puristusmyötörajaa, avautumis- ja sulkeutumistaso on lähellä nollaa. Vakioamplitudisessa kuormituksessa *small scale yielding* -ehdolla avautumis- ja sulkeutumistaso on lähes sama, mutta LCF-kuormituksessa särö avautuu ja sulkeutuu hyvin erilaisilla jännityksen arvoilla; jännitys-venymäkäyrässä havaitaan suurelle venymäamplitudille tyypillinen hystereesi. Kuvassa 4 särö sulkeutuu lähellä jännityksen minimiarvoa ja avautuu puristus- ja vetojännityksen transitoalueella. Venymäkontrolloidussa kuormituksessa kappaleen kokema plastinen muodonmuutos saa aikaan sen, että kuormitussuhde lähenee lokaalisti arvoa $R = -1$, eli keskijännitys lähenee nollaa, jolloin kuormitusjakson veto- ja puristusalueista tulee yhtä suuria. (Pippan & Hohenwarter 2017)

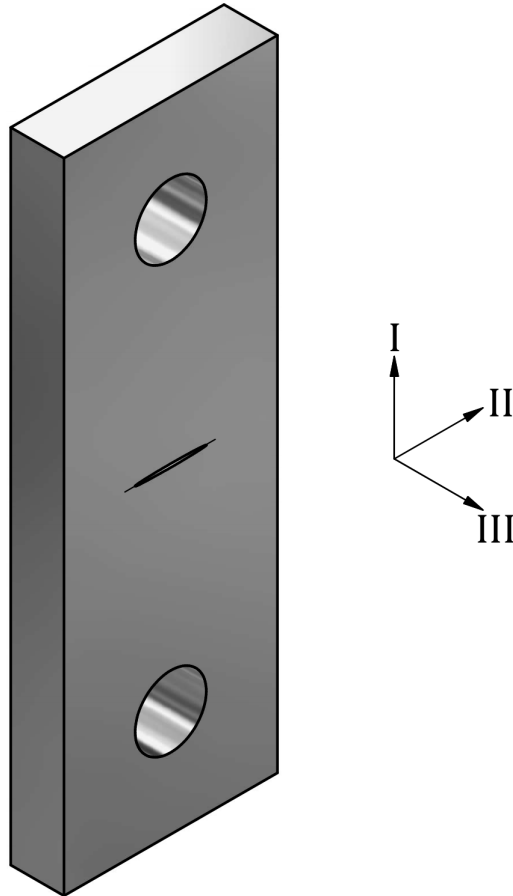
Särön sulkeutumisen aiheuttaja LCF-kuormituksessa on erilainen, kuin *small scale yielding* -ehdon alaisuudessa; LCF:ssä särön sulkeutumisen aiheuttaa alkutilasta riippumatta kuormitusjaksoon syntyvä, puristava jännitysosio yhdessä materiaalin elastisen kantokyvyn kanssa. Säröpinnoille kohdistuvat suuret puristusjännitykset aiheuttavat plastista muodonmuutosta, tehden karkeuden ja korroosion aiheuttamasta sulkeutumisesta merkityksetöntä. Kuormitusamplitudin pienentäminen LCF:stä HCF:ään ja edelleen *small scale yielding* -alueelle muuttaa sulkeutumismekanismeja yksinkertaisesta puristavan kuormituksen aiheuttamasta särön sulkeutumisesta plastisuuden, karkeuden ja korroosion aiheuttamaan, ennenaikaiseen sulkeutumiseen. (Pippan & Hohenwarter 2017)



Kuva 4: Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) saatuja kuvia venymäkontrolloidun LCF-väsytykskokeen yhden kuormitusjakson eri vaiheista (Pippan & Hohenwarter 2017).

3 SULKEUTUMISMEKANISMIT

Murtumismekaniikassa puhutaan kuormitustavoista I, II ja III. I on avaavaa, II särön etenemissuunnassa leikkaavaa ja III särörintaman suunnassa leikkaavaa kuormitusta (Pennala 2000). Puhuttaessa suunnista koesauvaan nähden, on hyödyllistä käyttää kuormitusakselien suuntia apuna (kuva 5).



Kuva 5: Kuormitusakselien suunnat murtumismekaniikassa koesauvan suhteen. I on kappaleen pituussuunta, II leveyssuunta ja III paksuussuunta.

3.1 Plastisuuden aiheuttama sulkeutuminen

Plastisuuden aiheuttamaa särön ennen aikaista sulkeutumista (PICC, plasticity induced crack closure) pidetään suurelta osin määrävänä sulkeutumismekanismina kimmoisien materiaalien väsymisessä (Camas et al. 2018). Vetokuormituksessa särön kärkeen muodostuva jännityskeskittymä saa aikaan väsymiskestävyyden kannalta suotuisaa plastista muodonmuutosta.

Avaavan, eli I-suuntaisen kuormituksen kasvaessa jännitys särön kärjessä kasvaa, ja materiaali saavuttaa myötörajan ensin aivan kärjen läheisyydessä (Pennala 2000). Kuormituksen edelleen kasvaessa, myötörajan saavuttanut alue laajenee, kasvaen suurimmilleen maksimikuormituksella. Myötöjännitys rajaa siis jännityskentästä alueen, jossa tapahtuu plastista muodonmuutosta. Kyseessä on niin kutsuttu plastinen alue, jonka sisällä materiaali on plastisesti venynyttä. Kun särö kasvaa muodostamansa plastisen alueen sisään, materiaali särön kärjen uuden sijainnin takana on plastisesti venynyttä, mikä saa aikaan sen, että kuormituksen laskiessa säröpintojen kontakti saavutetaan aiemmin, kuormituksen ollessa vielä vedolla (Elber 1970, 1971).

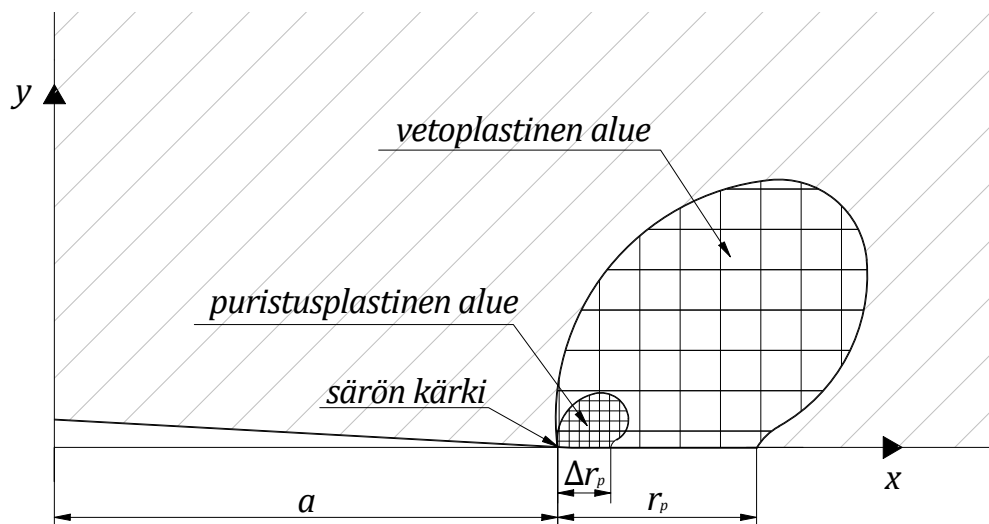
PICC:n kehittyminen on kumulatiivinen prosessi; vakioamplitudisessa kuormituksessa jokainen kuormitusjakso muodostaa uuden plastisen alueen kärjen eteen sen silloisessa sijainnissa, eli edetessään särön kärki jättää taakseen plastisesti venyneen alueen, jonka voidaan ajatella käyttäytyvän samoin, kuin särön väliin asetettavan kiilan. (Pippan & Hohenwarter 2017)

Särön kärjen taakse jäävän plastisen kiilan vaikutus pienenee, mitä kauemmas siitä särön kärki etenee. Välittömästi kärjen takana oleva plastinen kiila vaikuttaa suuresti siihen, kuinka aikaisin säröpintakontakti tapahtuu. Särön kasvaessa vaikutus pienenee ja lopulta häviää, mikä selittyy vipuefektillä; kaukaisen plastisen kiilan aiheuttama rotaatio aiheuttaa vain pienen siirtymän lähellä särön kärkeä. Särön edettyä jonkin matkaa, ensimmäisellä kuormitusjaksolla muodostuneen plastisen kiilan vaikutus häviää. Tällöin kuormitusjakson vaihe, jossa säröpintakontakti tapahtuu kuormituksen laskiessa, pysyy vastedes likimain vakiona, mikäli kuormituksen amplitudi pysyy vakiona; PICC on nyt täysin vakautunut. (Antunes & Rodrigues 2008)

Täytyy kuitenkin muistaa, että särön pituuden kasvaessa merkittävästi, kaavan (7) mukaisesti tapahtuva jännitysintensiteettikertoimen kasvu kasvattaa muodostuvaa plastista aluetta. PICC:n kehittyminen tapahtuu kuitenkin niin lyhyellä särön etenemällä, että jännitysintensiteettikertoimen maksimin voidaan ajatella pysyvän likimain vakiona (Camas et al. 2018). Vakioamplitudisessa kuormituksessa PICC:n täydelliseen kehittymiseen riittävän etenemän voidaan sanoa olevan likimain ensimmäisen kuormitusjakson aikaansaaman plastisen alueen pituuden verran (McClung 1994).

Toisaalta PICC:n kehittyessä, kärjessä tapahtuneen plastisen venymän aiheuttamat puristusjäännösjännitykset voimistuvat kuormituksen laskiessa, ja voivat niin ikään saavuttaa myötörajan. Minimikuormituksella voi siis muodostua toinen plastinen alue, missä venymä on negatiivista, eli materiaali puristuu plastisesti (McClung & Sehitoglu 1989a). Materiaalin kokema venymä kuormitusjakson maksimikuormituksella siis palautuu hieman minimikuormituksella. Globaali puristusjäännitys, jota kappale kokee esimerkiksi vaihtokuormituksessa, kuormitussuhteella $R = -1$, ei itsessään aiheuta kärjen plastisoitumista, sillä samanlaista jännityskeskittymää ei muodostu puristusjäännitykselle, kuin vetojäännitykselle, koska särö välittää puristusta, mutta ei vetoa. Kuormitusjakson ollessa osaksi puristuksella, ulkoinen puristusjäännitys yhdessä kärjen plastisen venymän aiheuttamien puristavien jäännösjännitysten kanssa kuitenkin aiheuttaa suuremman puristavan kokonaisjännityksen, minä vuoksi plastisesti puristunut alue kasvaa kuormitussuhteen laskiessa (McClung & Sehitoglu 1989a).

Eritellään nämä kaksi plastista aluetta kuvaavasti vetoplastiseksi ja puristusplastiseksi alueeksi (kuva 6). Vetoplastisesta alueesta käytetään myös termiä monotoni-
nen plastinen alue (monotonic plastic zone), ja puristusplastisesta alueesta termiä
käänteinen tai jaksollinen plastinen alue (reversed plastic zone, cyclic plastic zone)
(McClung & Sehitoglu 1989b; Pippin & Hohenwarter 2017).



Kuva 6: Havainnollistava kuva väsytyssärön plastisista alueista. Särö kasvaa x -akselin suuntaan, kuormituksen ollessa y -akselin suuntainen. Symmetria x -akselin suhteen.

Minimikuormalla tapahtuva plastinen puristuminen rajoittuu pienemmälle alueelle, kuin maksimikuormalla tapahtuva plastinen venyminen; vetoplastinen alue on siis puristusplastista aluetta suurempi (McClung & Sehitoglu 1989b). Staattisen särön plastisten alueiden pituuksien suhteeksi on arvioitu $1/4$ (Rice 1967). Tasojännitys-tilassa, *small scale yielding* -ehdon täytyessä staattisen särön vetoplastisen alueen pituus r_{pl} Irwinin estimaatin mukaan saadaan kaavalla (12) (Pennala 2000; Pippan & Hohenwarter 2017),

$$r_{pl} = \frac{K^2}{\pi\sigma_y^2} \quad (12)$$

jossa K on jännitysintensiteettikerroin ja σ_y myötöraja. Puristusplastisen alueen pituus Δr_{pl} saadaan kaavalla (13) (Pippan & Hohenwarter 2017),

$$\Delta r_{pl} = \frac{\Delta K^2}{\pi 4\sigma_y^2} \quad (13)$$

jossa ΔK on jännitysintensiteettikertoimen heilahdus, joka täytyy särön sulkeutumismekanismien kehittyessä korvata kaavan (5) mukaisella efektiivisellä jännitysintensiteettikertoimen heilahduksella ΔK_{eff} , jolloin saadaan kaava (14) (Pippan & Hohenwarter 2017).

$$\Delta r_{pl} = \frac{\Delta K_{eff}^2}{\pi 4\sigma_y^2} \quad (14)$$

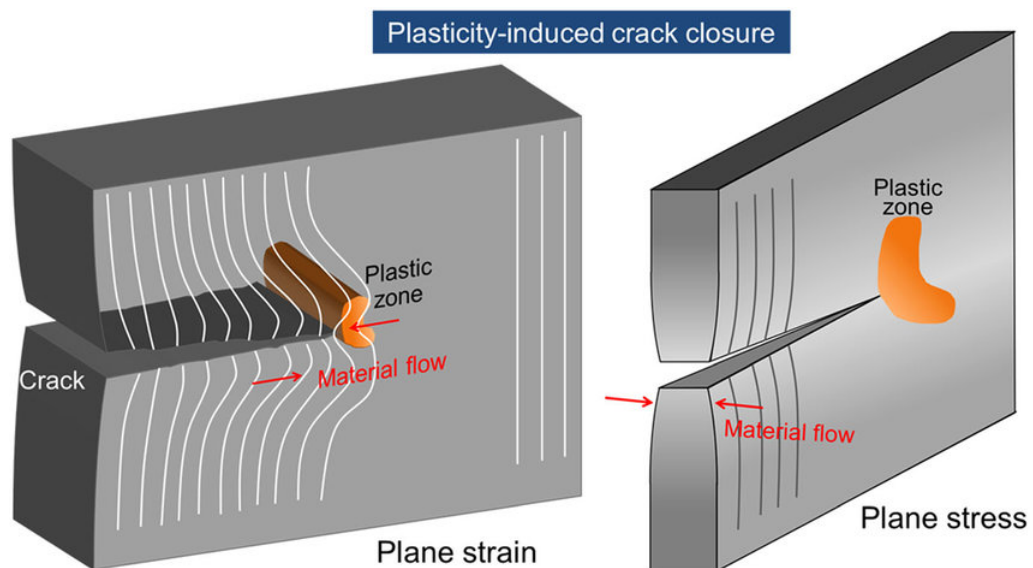
Kolmiulotteisen kappaleen kuormittamattomalla pinnalla pinnan normaalin suuntainen jännitys on nolla sisäisten ja ulkoisten voimien tasapainoehdon vuoksi (Pennala 2000). Pinnalla vallitsee siis tasojännitystilä (plane stress condition); tasojännitystilassa tason normaalin suuntainen jännitys on nolla (Liu & Quek 2014d). Pinnan alle kehittyy kuitenkin myös pinnan normaalin suuntaisia jännityksiä deformaation osittain estyessä ympäröivän materiaalin vaikutuksesta. Likimääräisesti voidaan sanoa, että tarpeeksi paksun kappaleen keskellä vallitsee tasovenymätilä (plane strain condition); tasovenymätilassa tason normaalin suuntainen kokonaisvenymä on nolla (Liu & Quek 2014d). Avaavasti kuormitetulla koesauvalla tarkastelukohdan liikkues- sa kuormittamattomalta sivupinnalta III-suunnassa kappaleen sisälle, III-suuntainen jännitys alkaa kasvaa, ja venymä pienentyä; III-suuntainen leikkaus muuttuu tasojännitystilasta kohti tasovenymätilaa.

Täytyy muistaa, että venymää voi olla sekä plastista, että elastista, ja kokonaisveny-

män voidaan arvioida olevan plastisen ja elastisen venymän summa. Tasovenymätila siis sallii plastisen venymän tason normaalin suuntaan, mikäli se kumoutuu samansuuruksella, vastakkaismerkkisellä elastisella venymällä (McClung et al. 1991).

Metallisen kappaleen kokema plastinen muodonmuutos ei muuta sen tilavuutta, jolloin I-suuntaan tapahtuva plastinen venymä täytyy tasapainottaa johonkin muuhun suuntaan tapahtuvalla, negatiivisella plastisella venymällä (McClung et al. 1991). Voidaan siis ajatella, että materiaalia siirtyy jostakin suunnasta I-suuntaan. Kolmiulotteisella kappaleella suunta, josta merkittävin osa I-suuntaan siirtyneestä materiaalista on peräisin, riippuu kappaleen geometriasta.

Ohuella, levymäisellä kappaleella, suurin osa kuormituksen suuntaan tapahtuvan venymän mahdollistavasta materiaalista on siirtynyt paksuussuunnasta, eli III-suunnasta, kuvan 7 mukaisesti (Chowdhury & Sehitoglu 2016). III-suuntaista muodonmuutosta vastustavan jännityksen keskiarvo paksuussuunnassa on likimain nolla, eli kappaleessa vallitseva tila on likimain tasojännitystilä.

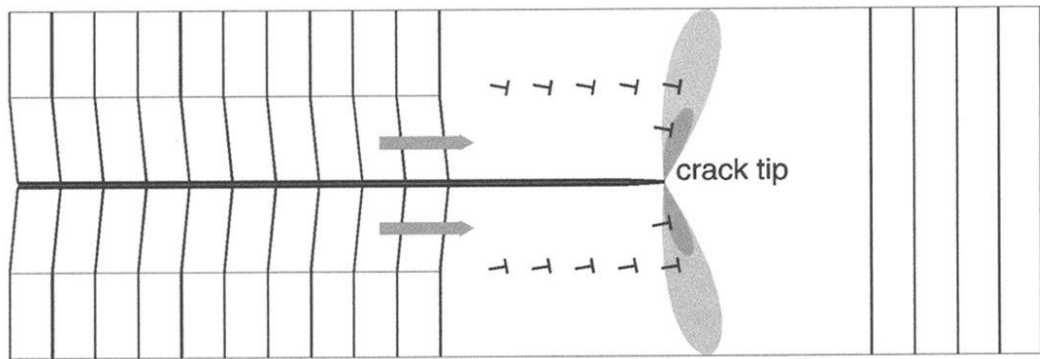


Kuva 7: Havainnollistava kuva PICC:n materiaalivirrasta (Chowdhury & Sehitoglu 2016). Vasemmassa kuvassa, tasovenymätilan vallitessa, materiaali siirtyy särön kärkeen II-suunnasta kärjen takaa, ja oikeassa kuvassa, tasojännitystilän vallitessa, materiaali siirtyy III-suunnasta, ja kappale ohenee.

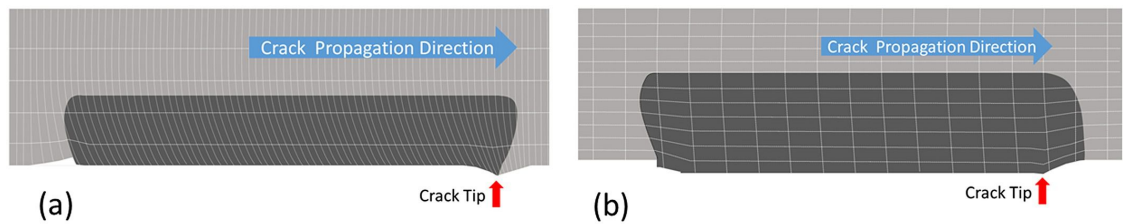
Paksulla kappaleella suurin osa kuormituksen suuntaan siirtyvästä materiaalista on peräisin särön etenemissuunnasta, eli II-suunnasta, kärjen takaa, kuten kuvassa 7 (Chowdhury & Sehitoglu 2016). III-suuntaista muodonmuutosta vastustava jännitys on suuri paksun kappaleen sisällä, jolloin materiaalia ei pääse samassa määrin

siirtymään III-suunnasta, kuin ohuella kappaleella. III-suuntaisen venymän keskiarvo paksuussuunnassa on likimain nolla, eli kappaleessa vallitseva tila on likimain tasovenymätila.

Tasovenymätilassa särön kärjen taakseen jättämä plastisoitunut alue on kokenut leikkausmuodonmuutosta II-suuntaan, mikä on aiheuttanut tilavuuselementtien kallistumisen lähellä säröpintoja – materiaalihiivat ovat vääristyneet särön kärkeä kohti. Materiaalin siirtyminen II-suunnassa selittyy geometrisesti välttämättömillä dislokaatioilla, jotka muodostuvat särön avautuessa, ympäröivän elastisen aineen rajoittaessa muodonmuutosta. Säröpintojen läheisyydessä olevien tilavuuselementtien rotaatio aiheuttaa raerajamaisen dislokaationauhan särön molemmiin puolin, kuten kuvassa 8 on esitetty. (Pippan & Hohenwarter 2017)



Kuva 8: Materiaalin siirtyminen tasovenymätilassa (Pippan & Hohenwarter 2017). Geometrisesti välttämättömät dislokaatiot mahdollistavat tilavuuselementtien rotaation ja aineen siirtymisen särön kärkeen.



Kuva 9: Särön edetessä kärjen jännityskeskittymän muodostama plastisoitunut alue (a) tasovenymätilassa ja (b) tasojännitystilassa (Pippan & Hohenwarter 2017).

Kärjen läheisyydessä tapahtuva plastinen muodonmuutos on huomattavasti pienempää tasovenymätilassa, kuin tasojännitystilassa; materiaalin siirtyminen I-suuntaan ei ole yhtä vaivatonta. Tällöin kärjen eteen muodostuvan plastisen alueen pituus on pienempi; plastisuus on siis paikallisempaa tasovenymätilassa, mikä johtaa siihen, et-

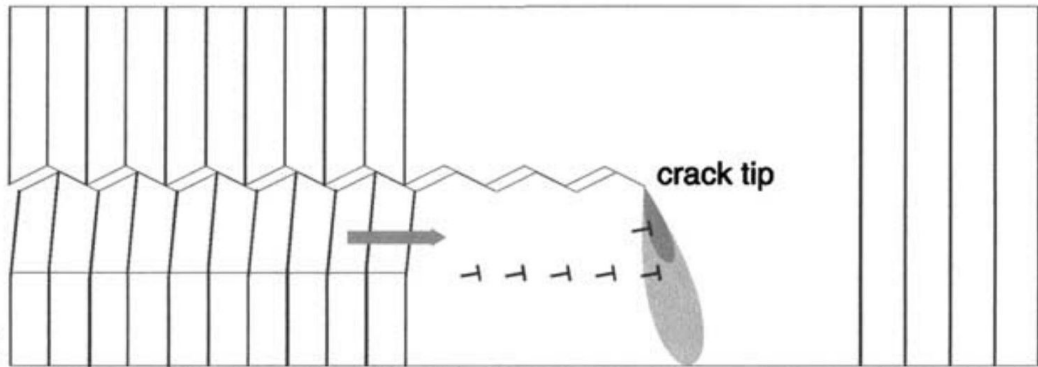
tei PICC ole yhtä voimakasta (kuva 9). Tästä seuraa, että kolmiulotteisessa kappaleessa etenevä särö sulkeutuu ensin reunoiltaan sisäänpäin, kappaleen keskellä olevan poikkileikkauksen sulkeutuessa myöhemmin, jos ollenkaan (Camas et al. 2018). Se, kuinka määräävä vaikutus kappaleen reunoilla vallitsevan tasojännitystilän huomattavasti voimakkaammalla PICC:llä on koko kappaleen väsymisiän kannalta, riippuu kappaleen paksuudesta (Pippan & Hohenwarter 2017).

Plastisuuden rajoittuessa pienelle alueelle, tasovenymätilassa tapahtuvaa PICC:tä on hankala havaita kokeellisesti, mikä yhdessä heikomman väsymisikää pidentävän vaikutuksen kanssa johti aikanaan väittelyyn siitä, tapahtuuko PICC:tä ollenkaan puhtaassa tasovenymätilassa. (McClung et al. 1991)

3.2 Karkeuden aiheuttama sulkeutuminen

Mikroskooppisesti epätasaisten säröpintojen yhteensopimattomuuden aiheuttamaa ennen aikaista kontaktia kutsutaan karkeuden aiheuttamaksi särön sulkeutumiseksi (RICC, roughness induced crack closure). Ilmiö on seurausta särön kasvupolun epä säännöllisyyden ja särön kärjen epäsymmetrisen plastisen muodonmuutoksen yhteistoiminnasta, mutta myös säröpintojen paikallisesta yhteensopimattomuudesta säröpintojen kuopissa tai huipuissa tapahtuneen plastisen muodonmuutoksen seurauksena (Pippan et al. 2004). I-suuntaisessa kuormituksessa syntyy mikrorakenteellisen epäisotrooppisuuden ja epähomogeenisuuden takia paikallisia, II- ja III-suuntaisia muodonmuutoksia, mikä aiheuttaa säröpintojen siirtymiä särötasossa. II- ja III-suuntaiset muodonmuutokset kuitenkin vaihtelevat rakeesta rakeeseen, tai peräti samassa rakeessa, jolloin niiden aiheuttaman sulkeutumisen pitäisi olla vain paikallinen ilmiö siirtymäerojen tasoittuessa pidemmällä välimatkoilla. (Pippan & Hohenwarter 2017)

Epäsymmetrinen muodonmuutos särön kärjen lähellä voi kuitenkin aiheuttaa säröpintojen yhteensopimattomuutta myös pidemmällä matkoilla, varsinkin lähellä jännitysintensiteettikertoimen kynnysarvoa ΔK_{th} , eli matala-amplitudisilla kuormituksilla. Suurilla jännitysintensiteettikertoimen arvoilla geometrisesti välttämättömien dislokaatioiden sijoittuminen on särötason suhteen symmetristä. Lähempänä kynnysarvoa, kun kärjen plastinen alue on yhden rakeen kokoluokkaa, muodonmuutos ja dislokaatioiden jakautuminen voi olla epäsymmetristä, kuten kuvassa 10, riippuen kuormituksen lisäksi myös paikallisesta kideorientaatiosta ja etäisyydestä rae-

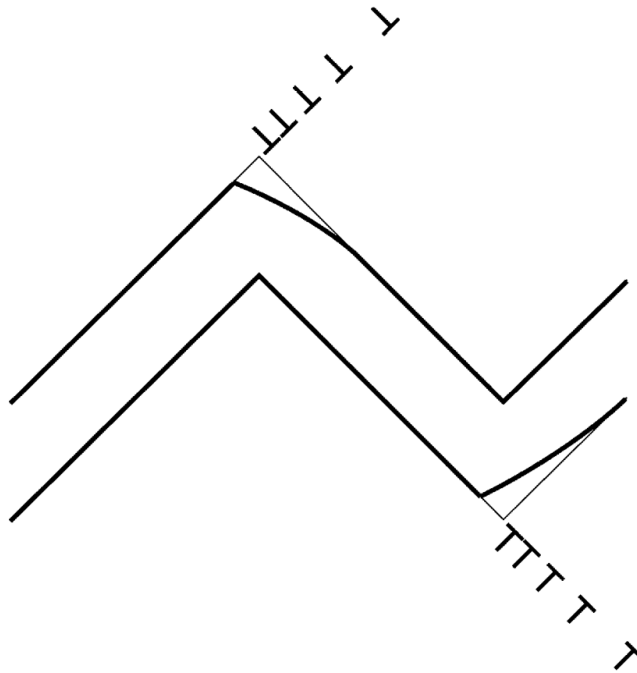


Kuva 10: Epäsymmetrinen muodonmuutos särön kärjen lähellä aiheuttaa epätasaisen säröpintojen yhteensopimattomuutta (Pippan et al. 2004).

tai faasirajaan. Täysin toispuoleinen dislokaatiojakauma voi syntyä, jos särö etenee lähellä raerajoja, tai kaksoisfaasimateriaalissa lähellä faasirajaa, toisen faasin ollessa huomattavasti kovempi. Paikallisen epäsymmetrisen muodonmuutoksen takia säröpintojen siirtymä toistensa suhteen vaihtelee särön etenemissuunnassa; siirtymäero kasvaa ensin siirryttäessä pois päin särön kärjestä, kunnes plastisen alueen pituutta suuremmilla etäisyyksillä se on likimain vakio. (Pippan et al. 2004)

RICC:n syntymistapa on samanlainen, kuin PICC:llä tasovenymätilassa – geometrisesti välttämättömät dislokaatiot aiheuttavat rakeiden rotaatiota, jolloin säröpinnan siirtymän suuruus riippuu rotaatiokulmasta sekä dislokaationauhan etäisyydestä säröpintaan. Etäisyyttä rajoittaa raekoko, minkä vuoksi RICC on voimakkaampaa suuren raekoon omaavilla materiaaleilla. RICC:lle on suotuisaa pieni, korkeintaan rakeen suuruusluokkaa oleva plastinen alue – jos plastinen alue on suurempi, kiteiden isotropia lisääntyy, ja muodonmuutos on symmetrisempää särötason suhteen. (Pippan et al. 2004; Pippan & Hohenwarter 2017)

RICC:tä ei aiheuta ainoastaan säröpintojen siirtymäerot, vaan plastisuuden takia kaksi epätasaisista säröpintaa voivat olla erilaisia (kuva 11). Tämä johtaa paikalliseen kontaktiin haarojen huipuissa, joissa dislokaatiot lähellä huippuja ovat taivuttaneet niitä. Mikä mekanismi määrää RICC:n voimakkuutta, riippuu huipun taipuman ja plastisen alueen koon suhteesta, sekä plastisen alueen ja -muodonmuutoksen epäsymmetrisyydestä. Jos plastinen alue on suhteessa pieni, huippujen paikallinen taipuma on määräävä. Jos huippujen taipuma on suhteessa pieni, ja epäsymmetrisyys on voimakasta, säröpintojen siirtymäero on määräävä. (Pippan et al. 2004)



Kuva 11: Dislokaatiot voivat saada särön haarojen huiput taipumaan, aiheuttaen säröpintojen yhteensopimattomuutta (Pippan et al. 2004).

3.3 Korroosion aiheuttama sulkeutuminen

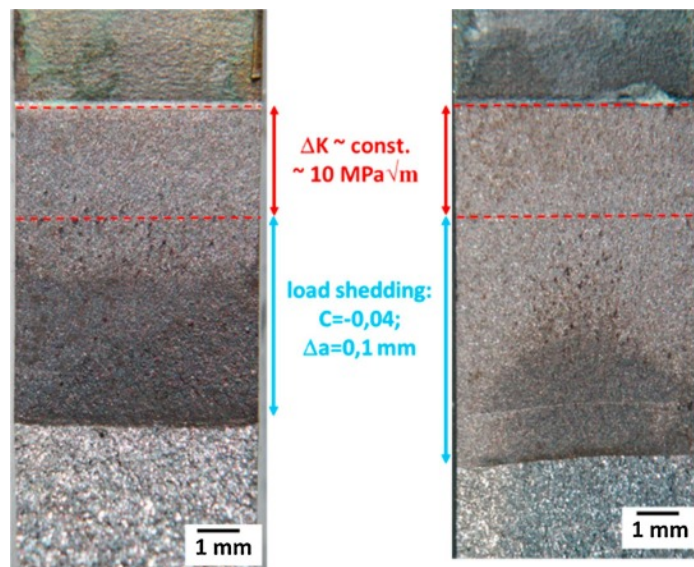
Korroosion eli oksidipartikkelien aiheuttama särön ennen aikainen sulkeutuminen (OICC, oxide induced crack closure) on seurausta oksidipartikkelien muodostumisesta säröpinnoille metallin reagoiessa ilman tai muun väliaineen sisältämän hapen kanssa. Särön edetessä happea sisältävässä väliaineessa, muodostuville säröpinnoille syntyy oksidikerros, joka voi säröpintojen väliin jäädessään aiheuttaa ennen aikaista kontaktia. (Suresh et al. 1981; Pippan & Hohenwarter 2017)

Oksidien tilavuus on perusainesta suurempi, jolloin myös oksidikerrosta voidaan ajatella säröön asetettavana kiilana. Korroosion vaikutus särön sulkeutumiseen kasvaa huoneenlämmössä ja sitä korkeammassa lämpötilassa, sekä kosteissa olosuhteissa. (Pippan & Hohenwarter 2017)

Useimpien metalliseosten pinnoille ehtisi muodostua luonnollisesti vain muutamien nanometrien paksuinen oksidikerros siinä ajassa, jossa suuren kuormanvaihtoluvun väsytyksessä kerroksen paksuus voi olla jo sadan nanometrin luokkaa; jaksollisessa kuormituksessa, jossa sulkeutumista tapahtuu, oksidikerros alati rikkoutuu ja muodostuu uudelleen, jolloin siitä tulee paksumpi (Pippan & Hohenwarter 2017). OICC

on voimakasta kuormituksen ollessa lähellä jännitysintensiiteettikertoimen kynnysarvoa ΔK_{th} , sekä matalilla kuormitussuhteilla, minimikuormituksen ollessa lähellä nollaa (Suresh et al. 1981; Pippan & Hohenwarter 2017). Negatiivisilla kuormitussuhteilla puristus tasoittaa säröpintoja, mikä voi säröpintojen välisen kitkan pienentyessä vähentää oksidien syntyä (Maierhofer et al. 2018).

Korroosiolle suotuisassa kuormituksessa ja ympäristössä säröpinnoille muodostuneen mustan oksidikerroksen voi nähdä paljaalla silmällä (Maierhofer et al. 2018). OICC voi selittää kynnysarvon lähellä havaittuja ilmiöitä, kuten riippuvuuden ympäristöolosuhteista, sekä kynnysarvon alapuolella, ennen särönkasvua tapahtuvan kuormituksen kasvunopeutta pienentävän vaikutuksen tämän jälkeiseen säröä kasvattavaan kuormitukseen. (Pippan & Hohenwarter 2017; Suresh et al. 1981)

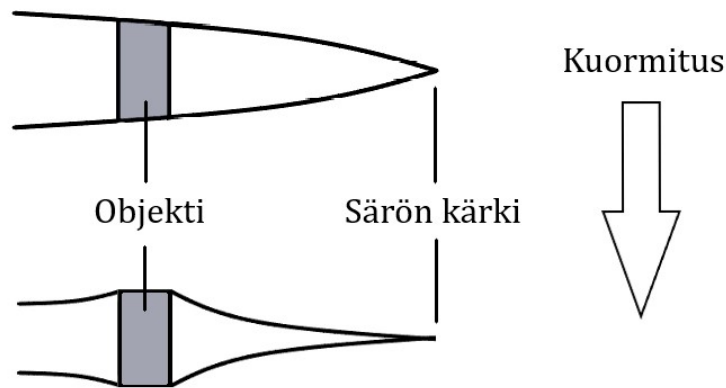


Kuva 12: Säröpinnoille muodostuneita oksidikerroksia (Maierhofer et al. 2018). Vasemmassa kuvassa oksidipartikkelien emissio on estetty suojaamalla särö teipillä. Kerros on tasainen ja paksu. Oikeassa kuvassa, jossa säröä ei ole suojattu, havaitaan ohuempi kerros, joka heikkenee särön reunoja kohti.

Oksidipartikkelit pakenevat säröstä varsinkin lähellä kappaleen ulkoreunoja, kuten kuvasta 12 nähdään. OICC on siis voimakkaampaa paksuilla kappaleilla, joilla oksidien emissio tapahtuu suhteessa pienemmältä alueelta, mikäli sitä ei ole estetty – etenkin ohuiden kappaleiden OICC tehostuu huomattavasti, jos särö suojataan siten, että oksidien emissio estyy. (Maierhofer et al. 2018)

3.4 Muut sulkeutumismekanismit

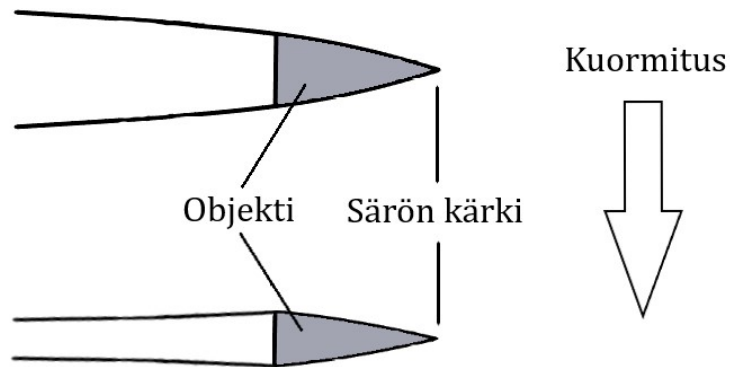
Ennen aikaista sulkeutumista aiheuttaa myös särön väliin joutuva objekti, jonka särönkasvua hidastava vaikutus riippuu objektin jäykkyyden lisäksi sen aiheuttaman kontaktin laajuudesta ja etäisyydestä särön kärkeen. Mikäli kontaktipinta-ala on pieni ja kaukana särön kärjestä, kontaktin ja kärjen välinen osa säröstä jatkaa sulkeutumistaan vielä kontaktin tapahduttua (kuva 13). Tällainen kontakti pidentää väsymisikää vain vähän. Jos kaavan (5) mukainen efektiivinen jännitysintensiteettikertoimen heilahdus ΔK_{eff} lasketaan käyttäen sulkeutumisjännitysintensiteettikertoimen K_{cl} sitä K :n arvoa, jolla säröpintojen ensimmäinen kontakti objektin välityksellä tapahtuu, saadaan epärealistisen matala tulos. (Vasudeven et al. 1994; Pippan & Hohenwarter 2017)



Kuva 13: Kaukana särön kärjestä tapahtuva, pienelle alueelle rajoittuva kontakti ei täysin suojaa särön kärkeä väsymisvaurion etenemiseltä.

Jos taas särön väliin joutuva objekti on kiilamainen, riittävän jäykkä ja sijaitsee kärjen välittömyydessä, kuten kuvassa 14, sekä sen aiheuttama kontakti ulottuu tarpeeksi suurelle pinta-alalle plastisoitumisen välttämiseksi, särön voidaan ajatella olevan sulkeutuneena niin kauan, kuin säröpintojen kontakti kiilan välityksellä tapahtuu. Tällöin kiilan aiheuttama kontakti voi suojata särön kärjen väsymisvaurion etenemiseltä täydellisesti. (Pippan & Hohenwarter 2017)

Vähemmän tunnettuja särön ennen aikaisten sulkeutumisen mekanismeista ovat faasimuutoksen sekä viskoosin nesteen aiheuttama särön sulkeutuminen (Vasudeven et al. 1994). Särön kärjen jännityskeskittymän alaisena osa austeniittia sisältävän mikrorakenteen austeniitista voi muuttua martensiitiksi, jonka tilavuus on austeniit-



Kuva 14: Särön kärjen välittömyydessä tapahtuva kiilamainen kontakti voi suojata särön kärjen väsymisvaurion etenemiseltä täysin.

tia suurempi. Tällöin kyseessä on faasimuutoksen aiheuttama särön sulkeutuminen. Kärkeä ympäröivän aineen tilavuuden kasvu aiheuttaa puristavia jäännösjännityksiä ja särön ennen aikaista sulkeutumista. (Mayer et al. 1995)

Viskoosin nesteen, kuten öljyn, pääsy säröön voi aiheuttaa ennen aikaista kontaktia säröpintojen välillä – ei kuitenkaan samassa määrin, kuin kiinteän aineen välittämä kontakti. Ilmiötä kutsutaan viskoosin nesteen aiheuttamaksi särön sulkeutumiseksi. Mitä korkeampi viskositeetti nesteellä on, sitä suurempi on sen kyky välittää säröpintojen painetta, mikä tehostaa ennen aikaista sulkeutumista. Toisaalta korkeampi viskositeetti heikentää nesteen läpäisevyyttä ja pääsyä säröön, mikä tekee viskoosin nesteen aiheuttaman sulkeutumisen ennustamisesta haastavaa. (Tzou et al. 1985)

4 NUMEERINEN MALLINTAMINEN

Numeerinen mallintaminen on nykyään paras tapa tutkia särönkasvua ja säröilmiöitä kokeelliseen mittaamiseen liittyvän epävarmuuden vuoksi. Tietokoneella tehtävässä simuloinnissa ilmiöön vaikuttavien parametrien muuttaminen on verrattaen todella helppoa, mikä mahdollistaa jokaisen parametrin vaikutuksen tutkimisen. (Antunes & Rodrigues 2008)

Tässä kappaleessa keskitytään plastisuuden aiheuttaman särön sulkeutumisen mallintamiseen. Metallisten materiaalien deformaation numeerinen mallintaminen tehdään tyypillisesti elementtimenetelmään pohjautuvalla tietokoneohjelmalla (Liu & Quek 2014a). Elementtimenetelmässä jatkuva aine jaetaan elementteihin, jotka kiinnitetään toisiinsa solmupisteistään. Säröilmiöitä on mallinnettu numeerisesti myös muilla työkaluilla, kuten differenssimenetelmällä (LLorca 1992).

Yleensä särön sulkeutumisen numeeriseen mallintamiseen liittyy kuitenkin vähintään joitakin seuraavista yksinkertaistuksista: kuormitukset ovat tarkkaan määriteltäviä, eikä oikeiden kuormitustilanteiden satunnaisuutta pystytä oikeaoppisesti huomioimaan, särön kärki on täydellisen terävä, särönkasvunopeus on epärealistisen suuri ja särön eteneminen tapahtuu diskreeteissä hyppäyksissä. (Antunes & Rodrigues 2008)

4.1 Mallinnusohjelmisto

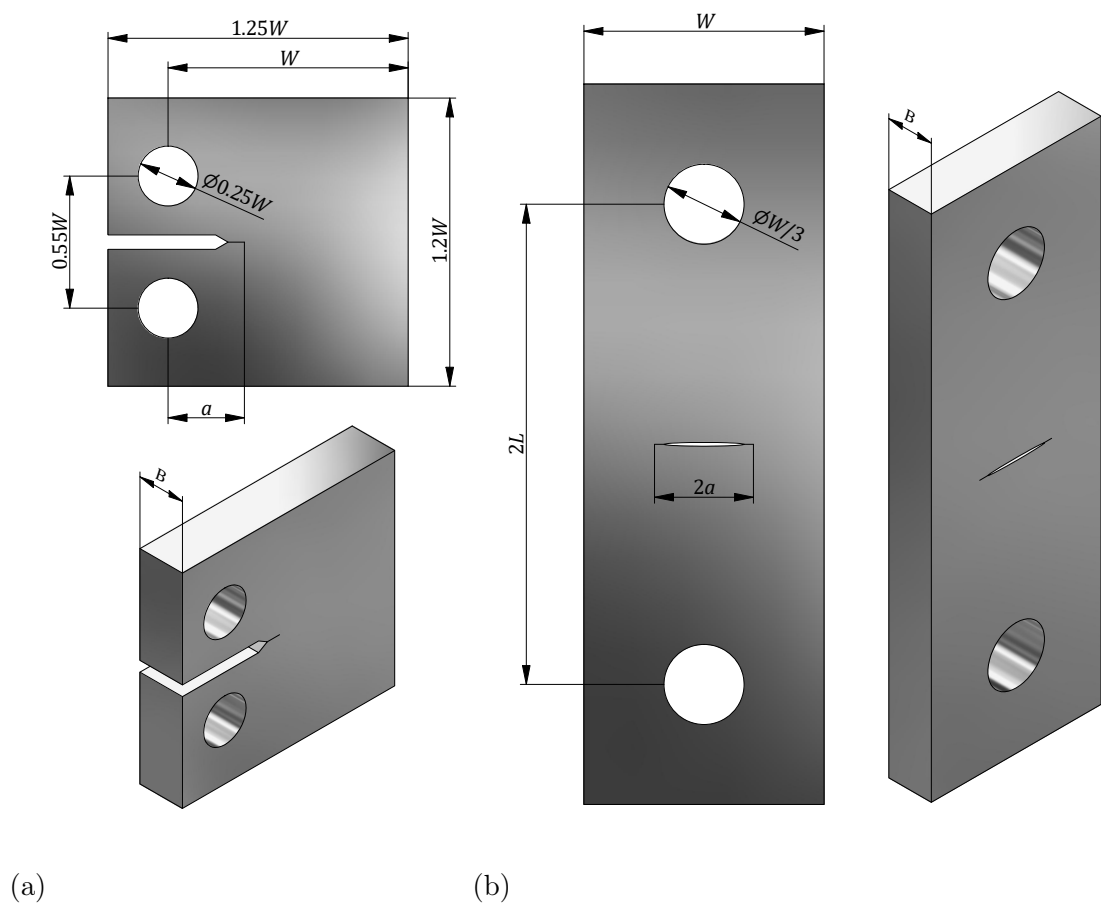
Elementtien solmupisteiden siirtymien ja voimien välille voidaan muodostaa differentiaaliyhtälösystemi sisäisten ja ulkoisten solmupistevoimien tasapainosta (Liu & Quek 2014e). Särön sulkeutumisesta simuloitaessa on oleellista kuvata kumulatiivinen plastinen deformaatio, jolloin FEM-ohjelma ratkaisee epälineaarisia tasapainoyhtälöitä hakemalla koko yhtälösystemin konvergenssia jotakin iterointimenetelmää, kuten Newtonin menetelmää hyödyntäen (McClung & Sehitoglu 1989a; Antunes & Rodrigues 2008; Liu & Quek 2014e).

Säröilmiöiden tutkimiseen soveltuu mikä tahansa tarpeeksi monipuolinen elementtimenetelmäohjelma. Ohjelman on mahdollistettava kaksi- tai kolmiulotteisen kappaleen geometrian jakaminen elementteihin käyttäjän määrittämällä tavalla tai valmiiksi verkotetun kappaleen tuominen, tukien ja muiden reunaehtoien asettaminen, kuormitusten asettaminen ja sijoittaminen halutusti, käyttäjän määrittämien mate-

riaaliominaisuuksien asettaminen, epälineaarisen yhtälösystemin vakaa ratkaiseminen, globaalin konvergenssin hallinta eli tulosten tarkkuusvaatimusten asettaminen ja tulosten tarkastelu solmu- ja integrointipistekohtaisesti. Nämä kriteerit täyttäviä, kaupallisia FEM-ohjelmia ovat muun muassa Abaqus ja Ansys (Liu & Quek 2014c).

4.2 Kappaleen geometria

Kappaleen geometria voidaan valita jonkin standardoidun koesauvan mukaan, jolloin numeerisia tuloksia voidaan vertailla empiirisiin ilman epävarmuutta eriävän geometrian tuottamasta virheestä. Koesauvat eroavat toisistaan muun muassa kiinnitystavan ja särön sijainnin suhteen. Useissa tutkimuksissa mallinnettu geometria mukailee standardin ASTM E647 mukaisia koesauvoja (Camas et al. 2018; Antunes & Rodrigues 2008), joista yleisimpiä ovat kuvan 15a *compact tension* (CT) ja kuvan 15b *middle tension* (MT) -sauvat.



Kuva 15: Standardin ASTM E647 mukaisia väsytykskokeissa käytettäviä koesauvoja; (a) CT-koesauva ja (b) MT-koesauva.

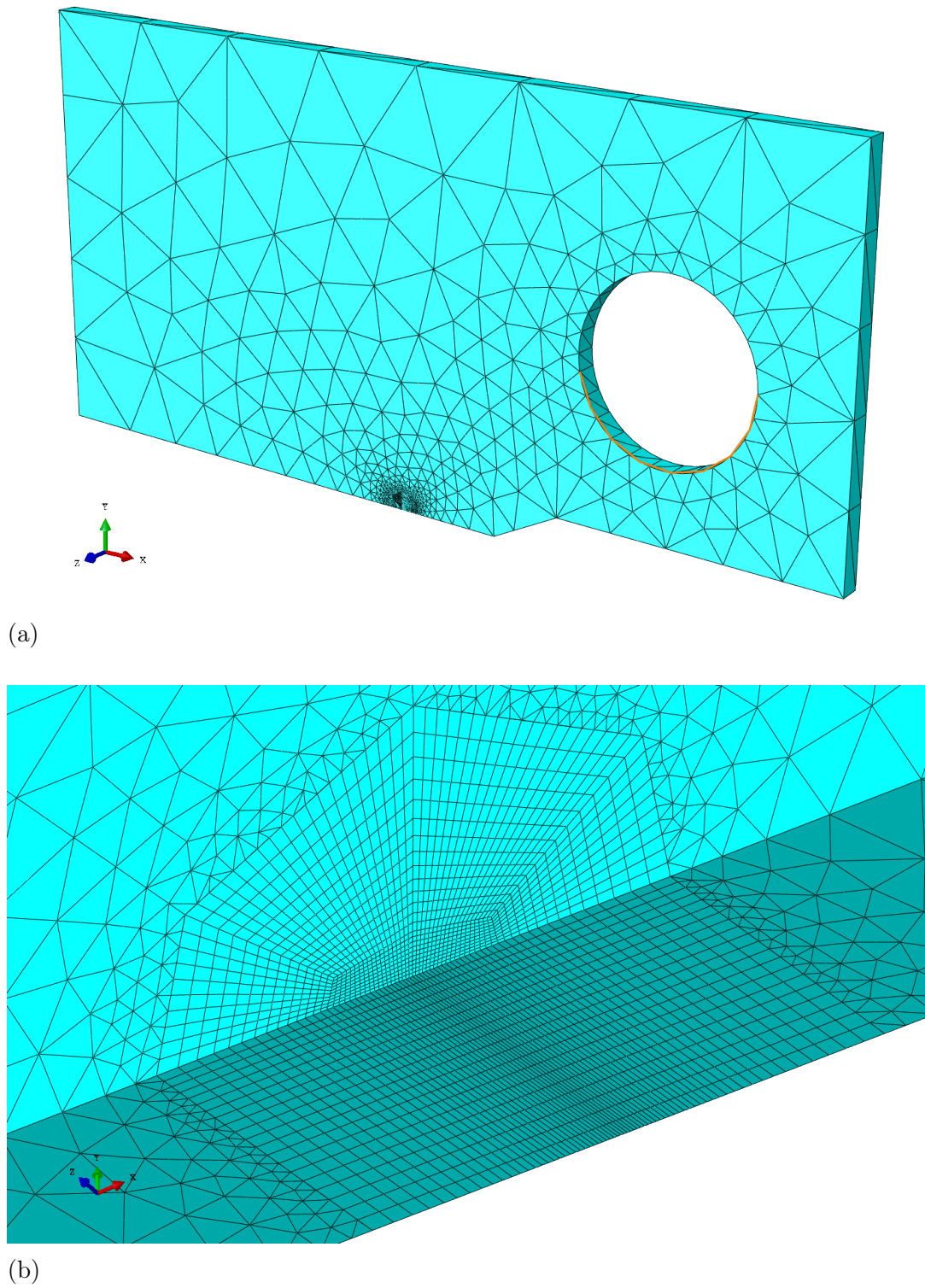
Mikäli koesauva kiinnitetään testauslaitteeseen rei'istä, kuten molemmat kuvan 15 sauvat, kuormituksen voidaan katsoa kohdistuvan reikien sisäpinnoille jakautuneena kuormana. Jotta kuormituksesta P voidaan vaivattomasti laskea jännitysintensiteettikerroin K , särön pituus a lasketaan kiinnitysreikien keskipisteiden kohdalta.

Kappale voidaan mallintaa joko kaksi- tai kolmiulotteisena. Kaksiulotteisessa mallissa tulee valita, noudattaako malli tasojännitys- vai tasovenymätilaa (Liu & Quek 2014d). Kolmiulotteisista malleista voidaan saada todenmukaista tietoa särörintaman muodonmuutosten vaihtelusta kappaleen paksuussuunnassa, eikä otaksumaa tasojännitys- tai tasovenymätilasta tarvita (Branco et al. 2008; Camas et al. 2011).

4.3 Elementtiverkko

Elementtiverkon on oltava sellainen, että materiaalin käyttäytyminen tarkastelualueella kuvautuu todenmukaisesti, kuitenkin siten, että analyysi on laskenta-ajan ja -resurssien puitteissa toteutuskelpoinen. Lineaarisista tai kvadraattisista neliö- tai kuutioelementeistä koostuvan verkon käyttö särön kärjen läheisyydessä on yleisesti hyväksyttyä (Antunes & Rodrigues 2008). Särön kärkeen muodostuu kuormituksessa jännityskeskittymä, jossa jännitys- ja venymävaihtelut ovat suuria; jotta niiden vaikutus kuvautuisi todenmukaisesti, täytyy elementtiverkon olla tiheä särön kärjen ympärillä (Camas et al. 2018), kuten kuvassa 16b.

Särön kärjen läheisyydessä tapahtuva plastinen muodonmuutos on tyypillisesti määräävä tekijä särön sulkeutumisessa (Camas et al. 2018). On siis järkevää suhteuttaa verkon tiheys plastisen alueen kokoon. Koska puristusplastinen alue on vetoplastista aluetta pienempi, se on elementtikoon kannalta määräävä (Antunes & Rodrigues 2008); jos elementtikoko on liian suuri, minimikuormituksella tapahtuva puristusplastisuus ei kuvaudu todenmukaisesti (McClung & Sehitoglu 1989a; Antunes & Rodrigues 2008). Jännitysintensiteettikertoimen kasvattaminen kasvattaa plastisten alueiden kokoa, mahdollistaen suurempien elementtien käytön, kun taas kuormitus-suhteen korottaminen pienentää puristusplastisen alueen kokoa, vaatien pienempien elementtien käyttöä (Antunes & Rodrigues 2008). Solanki et al. (2003) suosittelivat herkkyysanalyysinsä perusteella elementtikoon valinnan tehtävän siten, että puristusplastisen alueen pituus kattaa 3–4 lineaarielementtiä.



Kuva 16: Camasin ja kollegoiden (2018) kehittämää mallia mukaillen verkotettu CT-koesauvan neljännessymmetria. (a) Laskenta-ajan lyhentämiseksi elementtiverkko on harva kaukana särön kärjestä. (b) Tulosten tarkkuuden maksimoimiseksi elementtiverkko on tiheä lähellä särön kärkeä.

4.4 Särön etenemistapa

Kuten kuvasta 15 nähdään, kuvan kappaleilla särötasossa on myös kappaleen symmetriataso; FEM-mallissa voidaan usein hyödyntää tätä symmetriaa (Liu & Quek 2014b). Särönkasvua voidaan mallintaa esimerkiksi kiinnittämällä kappale solmupisteistään symmetriatasoon symmetriareunaehdolla. Tällöin symmetriatasossa täytyy olla myös kontaktin mahdollistava, jäykkä tai lähes jäykkä pinta, vastaamassa kappaleen toista puolta. Yksi tapa kuvata särön etenemistä symmetriatasossa on, että symmetriareunaehto poistetaan särörintaman solmupisteiltä, kun särön annetaan edetä. Tämä kuitenkin saa aikaan sen, että särön kärki on singulaarinen eli täysin terävä, mikä voi aiheuttaa numeerisia ongelmia ja epävarmuutta tuloksiin (Antunes & Rodrigues 2008).

Särön voidaan antaa edetä maksimikuormalla, minimikuormalla, tai jollakin näiden välisellä kuormalla. Mikään näistä ei kuitenkaan ole realistinen kuvaus oikeasta särönkasvuprosessista, sillä oikea särö kasvaa progressiivisesti koko kuormitusjakson aikana, eikä inkrementaalisesti jollain tietyllä kohtaa kuormitusjaksoa, kuten simulaatioissa (Antunes & Rodrigues 2008). Inkrementaalisessa etenemisessä totuudenmukaisimmalta kuulostaa eteneminen maksimikuormalla, mutta se on tuonut epästabiliisuutta ja suppenemisongelmia (McClung & Sehitoglu 1989a). Minimikuormalla eteneminen ratkaisee ongelman, mutta se on kauempana todellisen särön etenemistapaa. On kuitenkin havaittu, ettei kuormitusjakson kohdalla, jolla särön annetaan edetä, ole suurta vaikutusta tuloksiin (Solanki et al. 2003; McClung & Sehitoglu 1989a).

Vakioamplitudisessa kuormituksessa avautumistaso tyypillisesti nousee monotonisesti särön kasvaessa, kunnes se vakautuu särön sulkeutumismekanismien kehityttyä (Antunes & Rodrigues 2008). Särölle täytyy siis määritellä minimietenemä, jolla avautumistaso ei enää muutu, ja kasvattaa säröä jaksollisessa kuormituksessa vähintään sen verran. Yleensä riittää, että särö kasvaa ensimmäisen kuormitusjakson aikaansaaman plastisen alueen pituuden verran (McClung 1994).

Särönkasvunopeutta voidaan FEM-simulaatiossa säädellä elementtikoon muuttamisen lisäksi lisäämällä tai vähentämällä kuormitusjaksojen lukumäärää yhtä särönkasvuinkrementtiä kohden. Antunes & Rodrigues (2008) suosittelivat vähintään kahta kuormitusjaksoa yhtä kasvuinkrementtiä kohden; särön eteneminen jokaisella kuor-

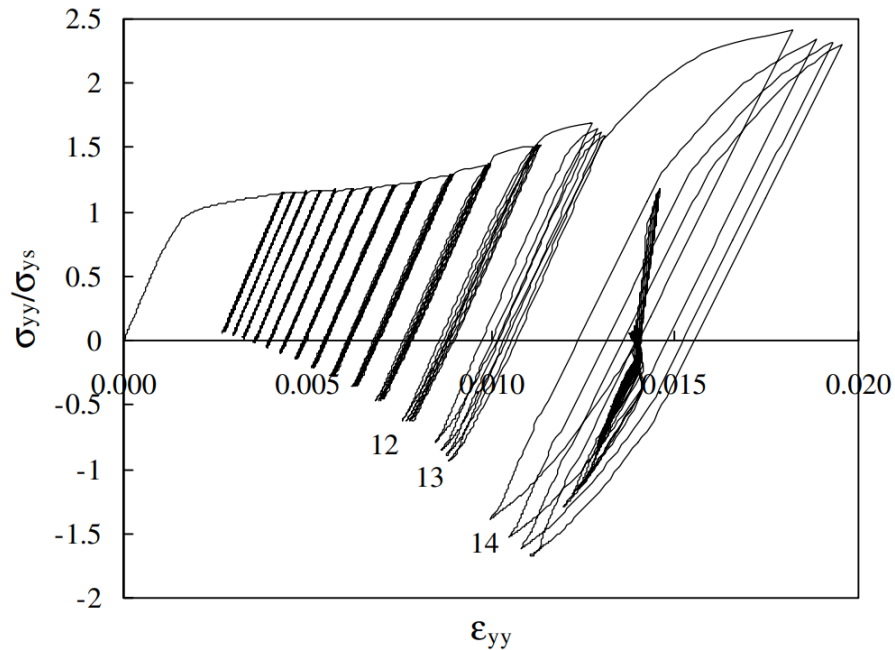
mitusjaksolla voi tuottaa epärealistisen korkeita avautumis- ja sulkeutumistasoja. Särönkasvunopeus on simulaatioissa yleensä moninkertainen oikeiden säröjen kasvunopeuksiin nähden laskenta-ajan lyhentämiseksi, mikä tuo epävarmuutta numeerisiin tuloksiin (Antunes & Rodrigues 2008).

4.5 Materiaalimalli

Materiaalimallin tehtävä on kuvata oikean tutkittavan materiaalin ominaisuuksia niin tarkasti, kuin on tarpeen. Väsyminen on ongelma etenkin metalleilla (Chowdhury & Sehitoglu 2016), minkä vuoksi suurin osa väsymistutkimuksesta, ja täten myös väsymissimulaatioiden materiaalimalleista, keskittyy metalleihin. Useimmat metallit ja metalliseokset käyttäytyvät kuormitettaessa kimmoplastisesti; myötörajan alapuolella tapahtuu pääasiallisesti elastista eli palautuvaa muodonmuutosta, ja myötörajan yläpuolella tapahtuu myös plastista eli palautumatonta muodonmuutosta. Metallien elastisessa muodonmuutoksessa jännitys-venymäsuhde on tyypillisesti likimain lineaarinen, jolloin se voidaan kuvata yksinkertaisesti lineaarisella Hooken lailla. Plastinen käyttäytyminen sen sijaan on monimutkaisempaa, sillä suurin osa metalleista muokkauslujittuu myötöjännityksen ylittävässä kuormituksessa. (Black & Kohser 2020)

Metallien plastisen käyttäytymisen tarkka numeerinen mallinnus vaatii materiaalimallin, joka kuvaa niiden muokkauslujittumiskäyttäytymisen oikein. Mallinnettaessa väsytyssärön kasvua, jossa särön kärjen plastisuus on jaksollista, sekä isotrooppinen, että kinemaattinen lujittuminen tulisi ottaa huomioon käyttämällä sekalujittumismalleja (Antunes & Rodrigues 2008). Vaikka plastisuuden aiheuttaman sulkeutumisen oletetaan aiheutuvan nimenomaan jaksollisesta plastisuudesta särön kärjessä, suuressa osassa tutkimuksia jännitys-venymäkäyttäytyminen kuvataan ideaaliplastisena (Solanki et al. 2003) tai bilineaarisena (Roychowdhury & Dodds 2003a; McClung & Sehitoglu 1989b). Lujittuminen huomioidaan tyypillisesti vain puhtaasti isotrooppisena tai kinemaattisena (Camas et al. 2018; Pommier & Bompard 2000), ja sekalujittumisen huomioivat tutkimukset ovat vielä harvassa.

Oikeilla materiaaleilla havaitaan myös monimutkaisempia muodonmuutosilmiöitä, kuten viruminen, jännitysrelaksaatio ja *strain ratcheting*, vaikkakin simulaatioissa nämä usein jätetään huomiotta. Mikäli materiaalimallilta vaaditaan mahdollisimman suurta tarkkuutta, tulee esimerkiksi aikariippuvuus ottaa plastista käyttäy-



Kuva 17: Tarkastelupisteen jännitys-venymäkäyrä särön kärjen edetessä sen ohi tykyttävässä kuormituksessa, kuormitussuhteella $R = 0.1$ (Antunes & Rodrigues 2008). Särön annetaan kasvaa joka neljännellä kuormitusjaksolla. Huolellisesti muodostetun materiaalmallin ansiosta keskijännitysrelaksaatio ja *strain ratcheting* ovat selvästi havaittavissa.

tymistä mallinnettaessa huomioon muun muassa tiedolla muodonmuutosnopeudesta (Haddadi et al. 2006). Kuvassa 17 havaitaan keskijännitysrelaksaatio (jännitys-venymäsilmukoiden translaatio samalla särönkasvuinkrementillä kohti tilaa, jossa keskijännitys on nolla) ja *strain ratcheting* (jännitys-venymäsilmukoiden translaatio samalla särönkasvuinkrementillä kohti hystereesin keskijännityksen merkkiä venymäakselilla) tarkastelupisteen jännitys-venymäkäyrässä, särön kärjen edetessä sen ohi jaksollisessa kuormituksessa. (Antunes & Rodrigues 2008)

4.6 Tulosten tulkinta

Tutkittaessa särön ennen aikaisen sulkeutumisen voimakkuutta, yksi kiinnostavimmista tuloksista on avautumis- ja sulkeutumistaso. Määritelmä sille, milloin särö on avonainen tai sulkeutunut, ei kuitenkaan ole yksiselitteinen. Yleisin sulkeutumisen kriteeri on säröpintojen solmupisteiden ensimmäinen kontakti, joka yleensä tapahtuu särön kärkeä edeltävässä solmupisteessä tai solmupisterintamassa. Kriteeri on kuitenkin vahvasti riippuvainen elementtikoosta; mitä lähempänä nykyistä kärkeä

solmupiste on, sitä korkeampia ovat sen avautumis- ja sulkeutumistasot. (Antunes & Rodrigues 2008)

Toinen usein käytetty kriteeri perustuu särön kärjen jännitystilaan – särön katsotaan olevan sulkeutunut, kun kärjen solmupiste tai solmupisterintama kokee puristusjännitystä (Antunes & Rodrigues 2008). Jännityksen suunnan vaihtumiseen eli jännitysinversioon perustuvan sulkeutumiskriteerin tuottamat tulokset ovat erilaisia, kuin kontaktikriteerin tulokset, etenkin sulkeutumistason kannalta (Ellyin & Wu 1999; Camas et al. 2018); särön sulkeutuessa, kärjen jännityksen suunta vaihtuu puristavaksi huomattavasti säröpintakontaktia aiemmin (Camas et al. 2018) – syynä voisi olla kärjen kokeman plastisen venymän aiheuttamat jäännösjännitykset; kuormituksen laskiessa kärjen plastisesti venynyt materiaali puristuu aiemmin. Toisaalta sama plastinen venymä aiheuttaa kärjen tylpistymistä, ja täten vastustaa kontaktia särön sulkeutuessa, mikä voi plastisuuden aiheuttaman sulkeutumisen ollessa merkittävää, olla syynä myös siihen, että kontaktikriteerillä särön sulkeutumistaso on avautumistasoa matalampi, kuten kirjallisuudessa on havaittu (McClung & Sehitoglu 1989b; Antunes & Rodrigues 2008; Camas et al. 2018).

Väsymisiän ennustamisen kannalta kaikista kiinnostavin suure on särönkasvunopeus da/dN , joka voidaan määrittää esimerkiksi J-integraalin (Ernst & Pollitz 1991) tai efektiivisen jännitysintensiteettikertoimen heilahduksen ΔK_{eff} (Kang et al. 1989) avulla. Avautumis- ja sulkeutumistason sekä särönkasvunopeuden lisäksi kärjen avautuma ΔCTOD sisältää hyödyllistä tietoa särön avautumiskäyttäytymisestä (Pippan & Hohenwarter 2017). Mikäli ΔCTOD määritetään särön kärkeä edeltävien solmupisteiden pystysiirtymästä, se joutuu kontaktikriteerillä määritetyn avautumis- ja sulkeutumistason tavoin elementtikoon vaikutuksen uhriksi. Särön profilia voidaan myös tarkastella kokonaisvaltaisemmin ilmoittamalla säröpinnan pystysiirtymä särön etenemissuuntaisen koordinaatin funktiona $d_y(x)$ (Antunes & Rodrigues 2008).

5 YHTEENVETO

Väsyttävässä kuormituksessa kasvavan särön kasvunopeus on lukuisien muiden tekijöiden lisäksi riippuvainen siitä, millaisen osuuden kuormitusjaksosta särö on avonainen. Tämä osuus pienenee särön ennenaikaisen sulkeutumisen mekanismien kehityessä. Ennen Elberin havaintoa 1970-luvun vaihteessa, särön ajateltiin olevan avonainen ulkoisen kuormituksen ollessa vedolla, ja sulkeutunut muulloin; Elber osoitti, että särö voi kärjen plastisuuden vuoksi olla sulkeutunut myös ulkoisen vetokuormituksen alaisuudessa. Plastisuuden aiheuttaman sulkeutumisen havaitsemisen jälkeen tunnistettiin useita muita sulkeutumismekanismeja, joista useat yleensä toimivat oikeassa väsytyssärössä enemmän tai vähemmän yhdessä. Ilmiön avulla kyetään selittämään muun muassa kuormitussuhteen ja -historian vaikutusta väsytyssärön käyttäytymiseen.

Ilmiötä ei kuitenkaan tunneta vielä niin hyvin, että sen vaikutukset pystyttäisiin luotettavasti ja kokonaisuudessaan ennustamaan. Suureksi avuksi ilmiön tutkimisessa on muodostunut numeerinen mallintaminen. Tietokonepohjaisessa mallintamisessa, esimerkiksi elementtimenetelmään perustuvalla ohjelmalla, väsymissimulaatioiden suorittaminen on fyysisiin väsytykokeisiin verrattuna tehokkaampaa ja halvempaa. Jotta ilmiön kokonaisvaltainen ennustaminen olisi tulevaisuudessa mahdollista, täytyy siitä saada riittävä määrä luotettavaa numeerista dataa, jonka perusteella empiiris-analyttiset mallit voidaan kalibroida.

6 LÄHDELUETTELO

Antunes F & Rodrigues D (2008) Numerical simulation of plasticity induced crack closure: Identification and discussion of parameters *Engineering Fracture Mechanics* 75(10): 3101 – 3120.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.12.009>

Black JT & Kohser RA (2020) *DeGarmo’s materials and processes in manufacturing* John Wiley & Sons.

Blom AF & Holm DK (1985) An experimental and numerical study of crack closure *Engineering Fracture Mechanics* 22(6): 997 – 1011.

DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90039-6)

Borges MF, Antunes FV, Prates PA et al. (2020) A Numerical Study of the Effect of Isotropic Hardening Parameters on Mode I Fatigue Crack Growth *Metals* 10(2).

DOI [10.3390/met10020177](https://doi.org/10.3390/met10020177)

Borrego L, Ferreira J, Pinho da Cruz J et al. (2003) Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure *Engineering Fracture Mechanics* 70(11): 1379–1397.

DOI [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00119-4)

Branco R, Rodrigues DM & Antunes FV (2008) Influence of through-thickness crack shape on plasticity induced crack closure *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 31(2): 209–220.

DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01216.x>

Broberg KB (1999) *3 - Basic Relations in Crack Mechanics* Broberg KB (toim.) *Cracks and Fracture* San Diego: Academic Press 45 – 98.

DOI <https://doi.org/10.1016/B978-012134130-5/50004-0>

Camas D, Garcia-Manrique J & Gonzalez-Herrera A (2011) Numerical study of the thickness transition in bi-dimensional specimen cracks *International Journal of Fatigue* 33(7): 921 – 928.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.02.006>

Camas D, Garcia-Manrique J, Moreno B et al. (2018) Numerical modelling of three-dimensional fatigue crack closure: Mesh refinement *International Journal of Fatigue* 113: 193 – 203.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.035>

- Camas D, Garcia-Manrique J, Perez-Garcia F et al. (2020) Numerical modelling of three-dimensional fatigue crack closure: Plastic wake simulation *International Journal of Fatigue* 131: 105344.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105344>
- Casperson MC, Carroll JD, Lambros J et al. (2014) Investigation of thermal effects on fatigue crack closure using multiscale digital image correlation experiments *International Journal of Fatigue* 61: 10 – 20.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.11.020>
- Chen D, Weiss B & Stickler R (1996) A model for crack closure *Engineering Fracture Mechanics* 53(4): 493 – 509.
DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00169-7](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00169-7)
- Chermahini RG (1986) Three-Dimensional Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Fatigue Crack Growth and Closure väitöskirja Old Dominion University Libraries.
DOI 10.25777/CXB0-9J03
- Choi HC & Song JH (1995) Finite element analysis of closure behaviour of fatigue cracks in residual stress fields *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 18(1): 105–117.
DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1995.tb00145.x>
- Chowdhury P & Sehitoglu H (2016) Mechanisms of fatigue crack growth – a critical digest of theoretical developments *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 39(6): 652–674.
DOI <https://doi.org/10.1111/ffe.12392>
- Christensen R (1963) Fatigue crack growth affected by metal fragments wedged between opening-closing crack surfaces *Appl Mater Res* 2(4): 207–10.
- Dougherty J, Padovan J & Srivatsan T (1997) Fatigue crack propagation and closure behavior of modified 1070 steel: Finite element study *Engineering Fracture Mechanics* 56(2): 189 – 212.
DOI [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(96\)00104-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(96)00104-X)
- Dubey S, Soboyejo A & Soboyejo W (1997) An investigation of the effects of stress ratio and crack closure on the micromechanisms of fatigue crack growth in Ti-6Al-4V *Acta Materialia* 45(7): 2777 – 2787.
DOI [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00380-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00380-1)

- Dugdale D (1960) Yielding of steel sheets containing slits *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 8(2): 100 – 104.
DOI [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(60\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(60)90013-2)
- Elber W (1970) Fatigue crack closure under cyclic tension *Engineering Fracture Mechanics* 2(1): 37 – 45.
DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(70\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0013-7944(70)90028-7)
- Elber W (1971) *The Significance of Fatigue Crack Closure* West Conshohocken, PA: ASTM International 230–242.
DOI 10.1520/STP26680S
- Ellyin F & Ozah F (2010) 3D modelling of plasticity induced fatigue crack closure-effect of material constitutive relations *Engineering Fracture Mechanics* 77(11): 1693 – 1707. *International Conference on Crack Paths 2009*.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.01.016>
- Ellyin F & Wu J (1999) A numerical investigation on the effect of an overload on fatigue crack opening and closure behaviour *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 22(10): 835–847.
DOI <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.1999.00223.x>
- Ernst H & Pollitz E (1991) Modeling Elastic Plastic Crack Growth With the Dugdale Model *Defect Assessment in Components-Fundamentals and Applications*, ESIS/EGF9, JG Blauel and KH Schwalbe, Editors.
- Forman RG & Mettu SR (1990) Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy.
- Gardin C, Fiordalisi S, Sarrazin-Baudoux C et al. (2016) Numerical prediction of crack front shape during fatigue propagation considering plasticity-induced crack closure *International Journal of Fatigue* 88: 68 – 77.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.03.018>
- Haddadi H, Bouvier S, Banu M et al. (2006) Towards an accurate description of the anisotropic behaviour of sheet metals under large plastic deformations: Modelling, numerical analysis and identification *International Journal of Plasticity* 22(12): 2226 – 2271.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.03.010>

- Hershko E, Mandelker N, Gheorghiu G et al. (2008) Assessment of fatigue striation counting accuracy using high resolution scanning electron microscope Engineering Failure Analysis 15(1): 20 – 27.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.01.005>
- Irwin G (1968) Linear fracture mechanics, fracture transition, and fracture control Engineering Fracture Mechanics 1(2): 241 – 257.
DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(68\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0013-7944(68)90001-5)
- Jiang Y, Feng M & Ding F (2005) A reexamination of plasticity-induced crack closure in fatigue crack propagation International Journal of Plasticity 21(9): 1720 – 1740.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.11.005>
- Kang KJ, Song JH & Earmme YY (1989) Fatigue crack growth and closure through a tensile residual stress field under compressive applied loading Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 12(5): 363–376.
DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1989.tb00545.x>
- Kang KJ, Song JH & Earmme YY (1990) Fatigue crack growth and closure behaviour through a compressive residual stress field Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 13(1): 1–13.
DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1990.tb00572.x>
- Liu G & Quek S (2014a) Chapter 1 - Computational Modeling Liu G & Quek S (toim.) The Finite Element Method (Second Edition) second edition painos Oxford: Butterworth-Heinemann 1 – 11.
DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00001-1>
- Liu G & Quek S (2014b) Chapter 11 - Modeling Techniques Liu G & Quek S (toim.) The Finite Element Method (Second Edition) second edition painos Oxford: Butterworth-Heinemann 301 – 345.
DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00011-4>
- Liu G & Quek S (2014c) Chapter 13 - Using FEM Software Packages Liu G & Quek S (toim.) The Finite Element Method (Second Edition) second edition painos Oxford: Butterworth-Heinemann 397 – 421.
DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00013-8>
- Liu G & Quek S (2014d) Chapter 2 - Briefing on Mechanics for Solids and Structures Liu G & Quek S (toim.) The Finite Element Method (Second Edition) second

edition painos Oxford: Butterworth-Heinemann 13 – 41.

DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00002-3>

Liu G & Quek S (2014e) Chapter 3 - Fundamentals for Finite Element Method Liu G & Quek S (toim.) The Finite Element Method (Second Edition) second edition painos Oxford: Butterworth-Heinemann 43 – 79.

DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00003-5>

LLorca J (1992) Roughness-induced fatigue crack closure: a numerical study Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 15(7): 655–669.

DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1992.tb01304.x>

Louat N, Sadananda K, Duesbery M et al. (1993) A theoretical evaluation of crack closure Metallurgical Transactions A 24(10): 2225–2232.

DOI <https://doi.org/10.1007/BF02648597>

Maierhofer J, Simunek D, Gänser HP et al. (2018) Oxide induced crack closure in the near threshold regime: The effect of oxide debris release International Journal of Fatigue 117: 21 – 26.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.07.021>

Mayer H, Stanzl-Tschegg S, Sawaki Y et al. (1995) Influence of transformation-induced crack closure on slow fatigue crack growth under variable amplitude loading Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 18(9): 935–948.

DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1995.tb00918.x>

McClung R & Sehitoglu H (1989a) On the finite element analysis of fatigue crack closure—1. Basic modeling issues Engineering Fracture Mechanics 33(2): 237 – 252.

DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(89\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0013-7944(89)90027-1)

McClung R & Sehitoglu H (1989b) On the finite element analysis of fatigue crack closure—2. Numerical results Engineering Fracture Mechanics 33(2): 253 – 272.

DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(89\)90028-3](https://doi.org/10.1016/0013-7944(89)90028-3)

McClung RC (1994) Finite element analysis of specimen geometry effects on fatigue crack closure Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 17(8): 861–872.

DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1994.tb00816.x>

- McClung RC & Sehitoglu H (1992) Closure and Growth of Fatigue Cracks at Notches
Journal of Engineering Materials and Technology 114(1): 1–7.
DOI 10.1115/1.2904135
- McClung RC, Thacker BH & Roy S (1991) Finite element visualization of fatigue crack closure in plane stress and plane strain International Journal of Fracture 50(1): 27–49.
DOI 10.1007/BF00035167
- McEvily A, Nakamura T, Oguma H et al. (2008) On the mechanism of very high cycle fatigue in Ti–6Al–4V Scripta Materialia 59(11): 1207–1209.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.012>
- McEvily A & Ritchie R (1998) Crack closure and the fatigue-crack propagation threshold as a function of load ratio Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 21(7): 847–855.
DOI <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.1998.00069.>
- Nakamura H, Kobayashi H, Yanase S et al. (1984) Finite element analysis of fatigue crack closure in compact specimen Carlsson J & Ohlson N (toim.) Mechanical Behaviour of Materials Pergamon 817 – 823.
DOI <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8372-2.50104-4>
- Newman JA, Riddell WT & Piascik RS (2003) A threshold fatigue crack closure model: Part I – model development Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 26(7): 603–614.
DOI <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00660.x>
- Newman JC (1976) A Finite-Element Analysis of Fatigue Crack Closure West Conshohocken, PA: ASTM International 281–301.
DOI 10.1520/STP33952S
- Newman JC (1981) A crack-closure model for predicting fatigue crack growth under aircraft spectrum loading Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading ASTM International.
- Newman JC (1984) A crack opening stress equation for fatigue crack growth International Journal of Fracture 24(4): R131–R135.
DOI 10.1007/BF00020751

- Nicholas T (1999) Critical issues in high cycle fatigue *International Journal of Fatigue* 21: S221 – S231.
DOI [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00074-2)
- Ohji K, Ogura K & Ohkubo Y (1974) On the closure of fatigue cracks under cyclic tensile loading *International Journal of Fracture* 10(1): 123–124.
DOI 10.1007/BF00955089
- Ohji K, Ogura K & Ohkubo Y (1975) Cyclic analysis of a propagating crack and its correlation with fatigue crack growth *Engineering Fracture Mechanics* 7(3): 457 – 464.
DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(75\)90046-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(75)90046-6)
- Paris P & Erdogan F (1963) A Critical Analysis of Crack Propagation Laws *Journal of Basic Engineering* 85(4): 528–533.
DOI 10.1115/1.3656900
- Paris PC, Tada H & Donald J (1999) Service load fatigue damage — a historical perspective *International Journal of Fatigue* 21: S35–S46.
DOI [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00054-7)
- Park SJ, Earmme YY & Song JH (1997) Determination of the most appropriate mesh size for a 2-d finite element analysis of fatigue crack closure behaviour *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 20(4): 533–545.
DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1997.tb00285.x>
- Parry M, Syngellakis S & Sinclair I (2000) Numerical modelling of combined roughness and plasticity induced crack closure effects in fatigue *Materials Science and Engineering: A* 291(1): 224 – 234.
DOI [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00971-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00971-0)
- Pennala E (2000) *Lujuusopin perusteet 10. painos* Otatieto Espoo: Otatieto. Lisäpainokset: 11. muuttum. p. 2002.
- Pippan R & Hohenwarter A (2017) Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 40(4): 471–495.
DOI <https://doi.org/10.1111/ffe.12578>
- Pippan R, Strobl G, Kreuzer H et al. (2004) Asymmetric crack wake plasticity – a reason for roughness induced crack closure *Acta Materialia* 52(15): 4493 – 4502.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.014>

- Pommier & Bompard (2000) Bauschinger effect of alloys and plasticity-induced crack closure: a finite element analysis *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 23(2): 129–139.
DOI <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00259.x>
- Rice J (1967) Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue *Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue* 415: 247–309.
- Ritchie RO, Suresh S & Moss CM (1980) Near-Threshold Fatigue Crack Growth in 2 1/4 Cr-1Mo Pressure Vessel Steel in Air and Hydrogen *Journal of Engineering Materials and Technology* 102(3): 293–299.
DOI 10.1115/1.3224813
- Roychowdhury S & Dodds RH (2003a) A numerical investigation of 3-D small-scale yielding fatigue crack growth *Engineering Fracture Mechanics* 70(17): 2363–2383.
DOI [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(03\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00003-1)
- Roychowdhury S & Dodds RH (2003b) Three-dimensional effects on fatigue crack closure in the small-scale yielding regime – a finite element study *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 26(8): 663–673.
DOI <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00655.x>
- Shiratori M, Miyoshi T & Miyamoto H (1977) Analysis of the Crack Propagation and Closure Behavior in Fatigue *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers* 43(374): 3577–3593.
DOI 10.1299/kikai1938.43.3577
- Sih GC, Paris PC & Irwin GR (1965) On cracks in rectilinearly anisotropic bodies *International Journal of Fracture Mechanics* 1(3): 189–203.
DOI 10.1007/BF00186854
- Solanki K, Daniewicz S & Newman J (2003) Finite element modeling of plasticity-induced crack closure with emphasis on geometry and mesh refinement effects *Engineering Fracture Mechanics* 70(12): 1475 – 1489.
DOI [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00168-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00168-6)
- Suresh S & Ritchie R (1981) On the influence of fatigue underloads on cyclic crack growth at low stress intensities *Materials Science and Engineering* 51(1): 61 – 69.
DOI [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(81\)90107-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(81)90107-5)

- Suresh S & Ritchie RO (1982) A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture surface roughness *Metallurgical Transactions A* 13(9): 1627–1631.
DOI [10.1007/BF02644803](https://doi.org/10.1007/BF02644803)
- Suresh S, Zamiski GF & Ritchie RO (1981) Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior *Metallurgical and Materials Transactions A* 12(8): 1435–1443.
DOI [10.1007/BF02643688](https://doi.org/10.1007/BF02643688)
- Toribio J & Kharin V (2013) Simulations of fatigue crack growth by blunting–re-sharpening: Plasticity induced crack closure vs. alternative controlling variables *International Journal of Fatigue* 50: 72 – 82. Recent Progress in the Understanding of Fatigue Crack Propagation.
DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.02.019>
- Tzou JL, Hsueh C, Evans A et al. (1985) Fatigue crack propagation in oil environments— II. A model for crack closure induced by viscous fluids *Acta Metallurgica* 33(1): 117 – 127.
DOI [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(85\)90225-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(85)90225-1)
- Vasudeven A, Sadananda K & Louat N (1994) A review of crack closure, fatigue crack threshold and related phenomena *Materials Science and Engineering: A* 188(1): 1 – 22.
DOI [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90351-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90351-4)
- Vormwald M & Seeger T (1991) The consequences of short crack closure on fatigue crack growth under variable amplitude loading *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 14(2-3): 205–225.
DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1991.tb00654.x>